



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Experimentos de Combustión en el Equipo Hilton
Modelo C492

Tesis que para Obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Eléctrico presentan:

Cabrera Correa Prudencio
Delgado Lozada Enrique

Ingeniero Mecánico presenta:

Riquelme Morales Ricardo

Director de Tesis:
M.I. Vicente Guillermo López Fernández



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Enrique Delgado Lozada

A Dios por concederme una petición mas de mi corazón.

Dedico este trabajo a mi padre Jerónimo Delgado Angeles y a mi madre Rebeca Lozada Templos; por su cariño y quienes me han apoyado extensamente; así como a mi hermano Abel Delgado Lozada por su apoyo y disposición en todo momento.

Al Ing. Vicente López Fernández por compartir con nosotros su experiencia y guiarnos en la elaboración de este trabajo y al Honorable Jurado.

Al Ing. Octavio Velasco C. por sus valiosos consejos y aportaciones en la elaboración de la Tesis.

A mi mejor amigo Prudencio Cabrera C. por su compañerismo durante más de 15 años y por su paciencia.

A Ricardo Riquelme M. por su amistad y colaboración en la presente tesis.

Al Jefe de laboratoristas del L. M. T. Moisés Rodríguez B. y al laboratorista Gustavo Gonzáles B. por su apoyo técnico.

A mis amigos y compañeros del Laboratorio de Máquinas Térmicas, Gilberto, Alfonso, Margarito, Iliana, Ángel, Orlando, Paco, Aurelio, Rafael y Leobardo con quienes conservo una gran amistad.

Y a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, institución que me formó.

Agradecimientos

Prudencio Cabrera Correa

Agradezco a Dios por permitirme la existencia y haberme permitido concluir con mi carrera.

A mis padres Antonio Cabrera Domínguez y María Agustina Correa Rivera, por que son las personas más importantes de mi vida, al brindarme su apoyo, comprensión y cariño durante toda mi existencia y darme un buen ejemplo para respetar a todas las personas y tratar de ser siempre una mejor persona.

A mis hermanos Antonio, Juan y María Teresa por brindarme su apoyo incondicional.
¡Siempre cuento con ustedes!

A mi sobrino Luis Antonio por brindarme su alegría y cariño.

A Enrique Delgado Lozada (mi compadre), por su apoyo, consejos y bromas durante más de la mitad de mi existencia, sigue así y nunca cambies, eres muy buena persona.

A Ricardo Riquelme Morales por su apoyo en la elaboración de esta Tesis.

Al M.I. Vicente G. López Fernández por ser nuestro mentor y un ejemplo a seguir en los futuros años, gracias por su apoyo, consejos y enseñanzas.

A mis amigos Gilberto Moreno Cadenas (sigue adelante), Alfonso Sánchez Plata, Margarito Mejía Mejía, Ángel Valenzuela Sánchez, Iliana Guadalupe Luna de Salinas, Aurelio Rojas, Orlando Meza Jurado, Francisco Benítez Sánchez, Leobardo Salinas Ferrer y Rafael Garduño Nuñez.

Al Ing. Octavio Velasco Cristóbal por su apoyo y enseñanzas.

Al Jefe de Laboratoristas Moisés Rodríguez Benavides y al Laboratorista Gustavo Gonzales Bocardo por su apoyo en la realización de este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería UNAM, institución que me formo y quiero entrañablemente.

A todas las personas que han contribuido en mi formación, GRACIAS.

Agradecimientos

Ricardo Riquelme Morales

A DIOS

POR SU CONSTANTE GUÍA

AL M en I. VICENTE GUILLERMO LÓPEZ FERNÁNDEZ por su valiosa ayuda, guía y apoyo durante la realización de la tesis.

Al honorable Jurado.

A MI MADRE: ALICIA MORALES GARZA

POR SU GRAN EJEMPLO Y EL APOYO INCONDICIONAL DURANTE LA CARRERA.

A TODOS MIS HERMANOS: ALICIA, MARIA GUADALUPE, GERARDO, SUSANA, LUIS EDUARDO Y ALEJANDRO.

POR LA PACIENCIA Y APOYO DURANTE EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS: ENRIQUE Y PRUDENCIO.

POR SU AMISTAD, RESPALDO Y CONSEJOS DURANTE SU ESTANCIA EN EL LABORATORIO.

A TODOS LOS INTEGRANTES DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS: ÁNGEL, MARGARITO, PACO, ALFONSO, GUSTAVO, MOISÉS, ILIANA, ORLANDO, AURELIO, GILBERTO, LIDYA, GRACIELA, LEOBARDO Y RAFAEL POR SU AMISTAD.

A MI MAESTRA NORA.

A MARTHA.

Objetivo	
Introducción	1
Capítulo 1 Combustibles	
1.1.	Combustibles 2
1.2.	Clasificación de combustibles 3
1.2.1.	Madera y residuos vegetales 4
1.2.2.	Turbas
1.2.3.	Lignitos
1.2.4.	Hullas
1.2.5.	Antracita 5
1.2.6.	Combustibles sólidos artificiales
1.2.7.	Gasóleo y Diesel
1.2.8.	Combustibles líquidos residuales
1.2.9.	Gas natural
1.2.10.	Gas licuado del petróleo (G.L.P.)
1.2.11.	Gases residuales del refinado del petróleo
1.2.12.	Gas pobre, gas de agua y gas de alto horno
1.3.	Tipos de combustibles
1.3.1.	Combustóleo
1.3.2.	Combustible Diesel 6
1.3.3.	Gas natural 7
1.3.4.	Gas L.P.
1.4.	Elección de un combustible 8
1.5.	Propiedades de los combustibles
1.5.1.	Propiedades del carbón 9
1.5.1.1.	Poder calorífico del carbón
1.5.1.2.	Análisis inmediato 10
1.5.1.3.	Análisis elemental del carbón 12
1.5.1.4.	Determinación de la materia mineral 13
1.6.	Expresión de los resultados de un análisis en distintas bases
1.7.	Relación entre el carbón, el hidrógeno, la materia volátil y el poder calorífico 14
1.8.	Propiedades físicas del carbón
1.8.1.	Abrasividad
1.8.2.	Cohesión, friabilidad y fragilidad
1.8.3.	Molturabilidad o grindabilidad
1.8.4.	Finura de molienda
1.9.	Características de los combustibles líquidos 15
1.9.1.	Propiedades físico-químicas de los combustibles líquidos
1.9.1.1.	Densidad
1.9.1.2.	Viscosidad 16
1.9.1.3.	Fluidez crítica
1.9.1.4.	Inflamabilidad
1.9.1.5.	Residuos carbonosos o cok Conradson 17
1.9.1.6.	Contenido de azufre
1.9.1.7.	Contenido de cenizas
1.9.1.8.	Contenido en agua y sedimentos 18
1.9.2.	Poder calorífico de los combustibles líquidos 19
1.10.	Propiedades de los combustibles gaseosos 20
1.10.1.	Poder calorífico de los combustibles gaseosos
1.10.2.	Otras propiedades de los combustibles gaseosos 21
1.10.2.1.	Densidad del gas referida al aire
1.10.2.2.	Gasto calorífico
1.10.3.	Intercambiabilidad de los gases combustibles
1.11.	Almacenamiento, transporte y preparación de los combustibles 22

1.11.1.	Combustibles sólidos	
1.11.2.	Combustibles líquidos	23
1.11.3.	Combustibles gaseosos	
1.12.	Química de los combustibles	24

Capítulo 2 Combustión

2.1.	Procesos de combustión	27
2.2.	Fenómenos involucrados	
2.3.	Aspectos generales de la combustión	28
2.3.1.	Composición del aire	29
2.3.2.	Relaciones de aire / combustible	31
2.3.3.	Tipos de procesos de combustión	33
2.3.3.1.	Clasificación de los procesos de combustión	
2.3.3.2.	Simplificaciones habituales de las ecuaciones generales	35
2.4.	Factores que intervienen en la combustión	
2.5.	Cinética química de la combustión	36
2.5.1.	Introducción	
2.5.2.	Sistemas CHON	37
2.5.2.1.	Compuestos que intervienen	
2.5.2.2.	Análisis de sistemas CHON	38
2.5.3.	Formación de óxidos de nitrógeno	42
2.5.4.	Mecanismo de Zeldovich	
2.5.5.	Formación de oxidación de humos	43
2.5.6.	Formación de hidrocarburos sin quemar	44

Capítulo 3 Quemadores

3.1.	Introducción	47
3.2.	Curvas características de un quemador	
3.3.	Quemadores industriales de gas	49
3.3.1.	Criterios de selección	
3.3.2.	Tipos de quemadores	
3.3.2.1.	Quemadores de premezcla	50
3.3.2.2.	Quemadores atmosféricos	53
3.3.2.3.	Quemadores oxi-gas	55
3.3.2.4.	Quemadores de mezcla en boca de salida con aire a baja presión	
3.3.2.5.	Quemadores de mezcla en la boca de salida y aire a presión	
3.3.2.6.	Quemadores especiales	57
3.3.2.7.	Quemadores para alta temperatura	
3.4.	Quemadores para combustibles líquidos	58
3.4.1.	Partes constitutivas principales de un quemador de combustible líquido	
3.4.2.	Tipos de clasificaciones	
3.4.2.1.	Quemadores de gasificación o vaporización	
3.4.2.2.	Quemadores de pulverización	59
3.4.2.3.	Por el modo de regulación del gasto de combustible	68
3.4.2.4.	Por el modo de encendido	69
3.4.3.	Quemadores especiales	
3.4.4.	Tratamiento previo del combustible	70
3.5.	Quemadores de combustibles sólidos	
3.5.1.	Quemadores de carbón pulverizado	
3.5.2.	Cámara de combustión tipo ciclón	71
3.5.3.	Lechos Fluidizados	
3.5.3.1.	Características de la combustión fluidizada	
3.5.3.2.	Combustión en lechos fluidizados	72

3.5.3.3.	Consideraciones en el diseño y operación	74
3.5.4.	Calderas industriales	78
3.5.5.	Parrillas	80
3.6.	Quemadores tipo paquete	
3.7.	Accesorios y sistemas de seguridad para el manejo de quemadores	83

Capítulo 4 Descripción del equipo

4.1.	Introducción	85
4.2.	Cámara de combustión	
4.3.	Quemador tipo paquete para combustibles gaseosos	86
4.3.1.	Sonda de ionización	87
4.3.2.	Caja de control	
4.3.3.	Válvula de control de suministro de gas y aire	88
4.3.3.1.	Válvula solenoide	89
4.3.3.2.	Válvula multiblock	
4.3.4.	Compuerta de control para suministro de aire (damper)	
4.3.5.	Boquillas del quemador	
4.3.6.	Suministro de combustible (Gas)	90
4.3.7.	Suministro de aire	
4.4.	Quemador tipo paquete para combustibles líquidos	
4.4.1.	Fotocelda	91
4.4.2.	Caja de control	
4.4.3.	Válvula de tres vías	
4.4.4.	Suministro de combustible	92
4.5.	Sistema de enfriamiento	
4.6.	Panel de control	
4.7.	Instrumentación en el panel de control	94
4.8.	Sistemas de seguridad	
4.8.1.	Control de temperatura de agua de salida (corte)	
4.8.2.	Interruptor de flujo de agua	95
4.8.3.	Pastilla para sobrecarga (interruptor principal)	
4.8.4.	Cortacircuito de corriente residual	
4.8.5.	Purga y encendido	
4.9.	Chimenea	
4.10.	Estructura de soporte	

Capítulo 5 Instalación del equipo

5.1.	Localización	97
5.2.	Requerimientos de ventilación	99
5.3.	Chimenea	
5.4.	Sistema de alimentación de combustible	101
5.4.1.	Sistema de alimentación para combustibles gaseosos	
5.4.1.1.	Gas L.P.	
5.4.1.2.	Gas natural	103
5.4.2.	Sistema de alimentación para combustibles líquidos	
5.5.	Suministro de energía eléctrica	
5.6.	Suministro de agua de enfriamiento	105
5.7.	Purgas	

Capítulo 6 Operación del equipo

6.1.	Generalidades	107
6.2.	Procedimiento de operación de la cámara de combustión después de	

un periodo largo fuera de operación	108
6.3. Pruebas de seguridad simplificadas para cualquiera de los dos quemadores	109
6.3.1. Prueba de cortacircuito de corriente residual (RCCB)	110
6.3.2. Prueba del medidor de flujo de agua de enfriamiento	
6.3.3. Prueba del disyuntor de alta temperatura del agua de enfriamiento	
6.4. Pruebas de seguridad simplificadas para el quemador de gas	111
6.4.1. Detección de fugas en la tubería de gas	
6.4.2. Control de válvula multiblock	
6.4.3. Prueba de aislamiento del quemador	112
6.4.4. Prueba del control de presión de aire	
6.4.5. Prueba de sonda de ionización	
6.4.6. Prueba de encendido	
6.4.7. Prueba del interruptor de presión de gas	
6.5. Pruebas simplificadas de seguridad para el quemador de combustibles líquidos	113
6.5.1. Prueba de aislamiento del quemador	
6.5.2. Prueba de encendido	
6.5.3. Prueba de detección de falla de flama	
6.6. Procedimiento de operación del quemador de gas	114
6.6.1. Preparación del quemador de gas	115
6.6.2. Puesta en marcha de la unidad con quemador de gas	
6.6.3. Paro de emergencia	116
6.6.4. Apagado del quemador de gas	
6.7. Procedimiento de operación del quemador de combustibles líquidos	
6.7.1. Procedimiento para el cambio del quemador	
6.7.2. Puesta en marcha de la unidad	117
6.7.3. Paro de emergencia	118
6.7.4. Cambio de gasóleo a Queroseno o viceversa	
6.7.5. Cambio de boquillas del quemador	
6.7.6. Almacenamiento de la unidad por un periodo largo	119

Capítulo 7 Prácticas realizables en la cámara de combustión

7.1. Experimentos realizables en la cámara de combustión	124
7.1.1. Investigación del campo de regulación de potencia del quemador	
7.1.2. Investigación de la relación aire / combustible y la condición estequiométrica	
7.1.3. Comparación del análisis teórico y práctico de los gases producto de la combustión	
7.1.4. Comparación de dos combustibles líquidos	
7.1.5. Comparación de dos combustibles gaseosos	125
7.1.6. Balance de calor	
7.1.6.1. Balance de energía	
7.2. Experimentos utilizando el quemador para combustibles gaseosos	126
7.2.1. Investigación del campo de regulación de potencia del quemador	
7.2.1.1. Ejemplo de cálculos para las lecturas del gas L.P. Prueba No 4	129
7.2.2. Investigación de la relación aire / combustible y la condición estequiométrica	131
7.2.3. Comparación del análisis teórico y práctico de los gases producto de la combustión	135
7.2.3.1. Ejemplo de cálculos para las lecturas de gas L.P.	136
7.2.4. Comparación de dos combustibles gaseosos	142
7.2.5. Balance de calor	
7.2.5.1. Ejemplo de cálculo del balance de calor	
7.3. Experimentos utilizando el quemador para combustibles gaseosos	147
7.3.1. Investigación del campo de regulación de potencia del quemador	
7.3.1.1. Ejemplo de cálculos para el Diesel. (Prueba No 4)	150
7.3.2. Investigación de la relación aire / combustible y la condición estequiométrica	152
7.3.3. Comparación de dos combustibles líquidos	155

7.3.3.1. Ejemplo de cómo realizar los cálculos utilizando el combustible líquido (petróleo Diáfano) prueba No 3	158
Conclusiones	161
Anexo I Ecuaciones generales de conservación	i
Anexo II Analizadores de gases producto de la combustión	xiii
Anexo III Trenes de válvulas de gas	xxvii

Bibliografía

Objetivo

Realizar la instalación, explicar la operación y establecer los experimentos que se pueden realizar en la cámara de combustión marca Hilton modelo C492

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

El Laboratorio de Máquinas Térmicas (LMT) de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., fue creado con el propósito de brindarle al alumno el conocimiento práctico y teórico de las máquinas térmicas y sistemas de refrigeración; este laboratorio es dependiente de la división de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (DIMEI), y pertenece al área de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental.

En los últimos años, en el LMT se ha desarrollado un sistema de calidad, con el objetivo de mejorar el servicio y el nivel académico; se adquirió una Cámara de Combustión, para llevar a cabo experimentos relativos a la combustión. El equipo permitirá a los académicos dar a conocer a los alumnos los principios fundamentales de la combustión.

El nombre de Cámara de Combustión se debe a que se trata de un equipo en el que se quema combustible bajo condiciones estables, a diferencia de los equipos en los que se prueba la combustión por explosión o detonación (como los calorímetros ó motores de combustión interna).

Se desarrolla el trabajo de instalación y experimentación con la cámara de combustión, realizado con el propósito de conseguir la correcta operación de la misma, en este trabajo se ha recabado la información necesaria para obtener de ella su máximo aprovechamiento así como las condiciones de seguridad indispensables para su manejo.

A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de los capítulos de este trabajo:

En el capítulo 1 se pretende explicar la importancia de los combustibles, así como la clasificación de estos, los tipos que existen, sus propiedades y características; así como la correcta selección y almacenamiento dependiendo de su estado físico.

El capítulo 2 trata sobre el tema de la combustión, como proceso de oxidación, los fenómenos involucrados en ésta, sus aspectos generales, los factores que intervienen en ella y la cinética química de la combustión.

El capítulo 3 realiza un estudio por los diversos dispositivos que nos permiten llevar a cabo una combustión controlada; según el tipo del combustible utilizado, estudiando los tipos de quemadores para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos; así como sus aplicaciones y los componentes principales de éstos.

En el capítulo 4 se realiza una descripción de la Cámara de Combustión, y de cada uno de sus sistemas que la componen; como pueden ser: el sistema de suministro de combustible, los quemadores que contiene, ya sea para gas o líquido combustible, etc. Esto, con el fin de conocer sus componentes y su utilidad en la Cámara de Combustión.

El capítulo 5 contiene las especificaciones de los servicios que requiere la cámara de combustión para su correcto funcionamiento, así como una breve explicación de la instalación de estos; también se mencionan algunas recomendaciones especificadas por el fabricante para la instalación y la adecuada localización de la Cámara de Combustión dentro del laboratorio.

En el capítulo 6 se menciona el método de operación de la Cámara de Combustión, en el que se precisa paso a paso el procedimiento de operación (arranque, operación y paro, arranque y paro por falla de flama o por sobrecalentamiento, etc).

El capítulo 7 correspondiente al desarrollo de las prácticas que se puede llevar a cabo en este equipo, esto comprende el desarrollo de experimentos destinados a la enseñanza e investigación en apoyo de los programas académicos de las asignaturas en las que se imparte la teoría relacionada con la combustión.

Finalmente contiene los anexos que apoyan cada uno de los capítulos para el correcto empleo y funcionamiento de la Cámara de Combustión C492 dentro del Laboratorio de Máquinas Térmicas; como son: los aparatos para analizar los gases producto de la combustión, ecuaciones constitutivas entre otros.

CAPÍTULO 1

COMBUSTIBLES

1.1 COMBUSTIBLES

Un combustible es toda aquella sustancia que tiene la capacidad de reaccionar generalmente con el oxígeno (comburente), transformando una cierta cantidad de su energía química en forma de calor.

Los combustibles más usados comúnmente son los de origen fósil los cuales se clasifican según su estado físico en sólidos, líquidos y gaseosos. El desarrollo tecnológico del mundo se ha acelerado con la ayuda directa e indirecta de la quema de combustible de procedencia fósil. No obstante que existen otros combustibles como la biomasa y los carbones, siendo aún el petróleo el de mayor importancia.

El petróleo es un combustible líquido que se encuentra en la envoltura sedimentaria de la Tierra, su composición es una mezcla compleja de hidrocarburos y otros elementos como: hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno. Desde el punto de vista de su aspecto exterior es un líquido fluorescente, en general, el color del petróleo es función de su composición. El petróleo tiene un poder calorífico mayor que otros combustibles.

Actualmente, en todas partes del mundo, las prospectivas y explotación de yacimientos petrolíferos han tenido grandes éxitos. En forma intensiva se realizan estudios de prospección de yacimientos en el mar, y, en particular, en la plataforma continental. Las reservas mundiales de petróleo se estiman de 90 a 95 mil millones de toneladas, y las pronosticadas de 250 a 280 mil millones de toneladas. No obstante, algunos expertos proporcionan alrededor de 500 mil millones de toneladas.

Los yacimientos más grandes del mundo son; Arabia Saudita (15.7 mil millones de Toneladas); Kuwait (9.9 mil millones de Toneladas); Venezuela (5.9 mil millones de Toneladas); Irak (4.9 mil millones de Toneladas); Irán (2 mil millones de Toneladas); México (1.6 mil millones de Toneladas); en Argelia y Estados Unidos de Norteamérica.

La explotación industrial del petróleo comienza en el Siglo XX. Su extracción tuvo un incremento sustancial en los años 1950 a 1975; sin embargo, en el período siguiente su ritmo de crecimiento bajó considerablemente.

México ocupa el 4° lugar del mundo en cuanto a extracción de petróleo, el cuál se destina tanto a exportación como a consumo nacional. De la explotación mundial del petróleo, el 59% corresponde a los EE.UU.; 16% a España; 12% a Europa; 9% al lejano Oriente; el 3% a América Latina y 1% a otros países.

De esta forma la importancia del petróleo en el ámbito energético, el transporte y las diferentes ramas industriales es enorme. Del petróleo se producen casi todos los tipos de combustibles líquidos como pueden ser la gasolina, el diesel, el queroseno, el Petróleo diáfano, aceites lubricantes y combustóleo como productos comerciales.

Los gases combustibles naturales se componen generalmente de metano, etano, propano y butano e impurezas de hidrocarburos líquidos.

Las reservas privadas mundiales de gas natural se estiman de 86 billones de metros cúbicos y se pronostican en 120 billones de metros cúbicos.

El gas natural se ocupa ampliamente como combustible en centrales termoeléctricas, en la industria metalúrgica, del cemento, vidrio, para usos varios y domésticos.

Los carbones combustibles se ocupan de una forma muy limitada no obstante que representan un enorme potencial, ya que sus reservas probadas son mucho más abundantes que cualquier otro

energético convencional. Los problemas principales que presenta para su consumo a gran escala son, su alto contenido de cenizas y azufre, sumado a su complicado proceso de preparación. Además, bien se sabe que un combustible sólido proporciona una combustión ineficiente.

El más importante de los combustibles sólidos es el carbón mineral, producto compuesto en su mayor parte por carbono, y del cual existen diversas variedades en función de su grado de carbonización. Otros combustibles sólidos son la madera y el coque.

Los principales consumidores de carbón en nuestro país son las industrias que fabrican acero y hierro, y un pequeño porcentaje se emplea para la generación de energía eléctrica. La primera planta carboeléctrica del país es la planta "José López Portillo", que se localiza en Coahuila; en sus dos unidades, Río Escondido y Carbón II, utilizan como combustible carbón no coquizable que se obtiene de las minas cercanas a Piedras Negras. La planta carboeléctrica más importante del país se ubicada en el municipio La Unión en el Estado de Guerrero, con seis unidades en operación y con una capacidad nominal de 350 MW cada una, haciendo una capacidad instalada total de 2 100 MW. Estas plantas carboeléctricas contribuyen así con el 5.95 % de la energía eléctrica total generada a nivel nacional, al cierre del año 2003.

Por otro lado, los petróleos varían de forma considerable en cuanto a su contenido de azufre. Abundan los petróleos con un contenido de azufre superior al 2%. El petróleo con un porcentaje de azufre menor al 2 % se conoce como petróleo limpio y se extrae generalmente del mar del norte. El petróleo mexicano figura mundialmente entre los más azufrados con un contenido de este elemento que varía del 3.65 al 5.3% de su composición másica.

Aunque en cantidades muy pequeñas, los petróleos tienen algunos metales como: vanadio, níquel, hierro, magnesio, cromo, titanio, cobalto, potasio, calcio, sodio y otros. También contienen fósforo y silicio. En algunos derivados del petróleo se ha encontrado germanio del orden de 0.17 g/t.

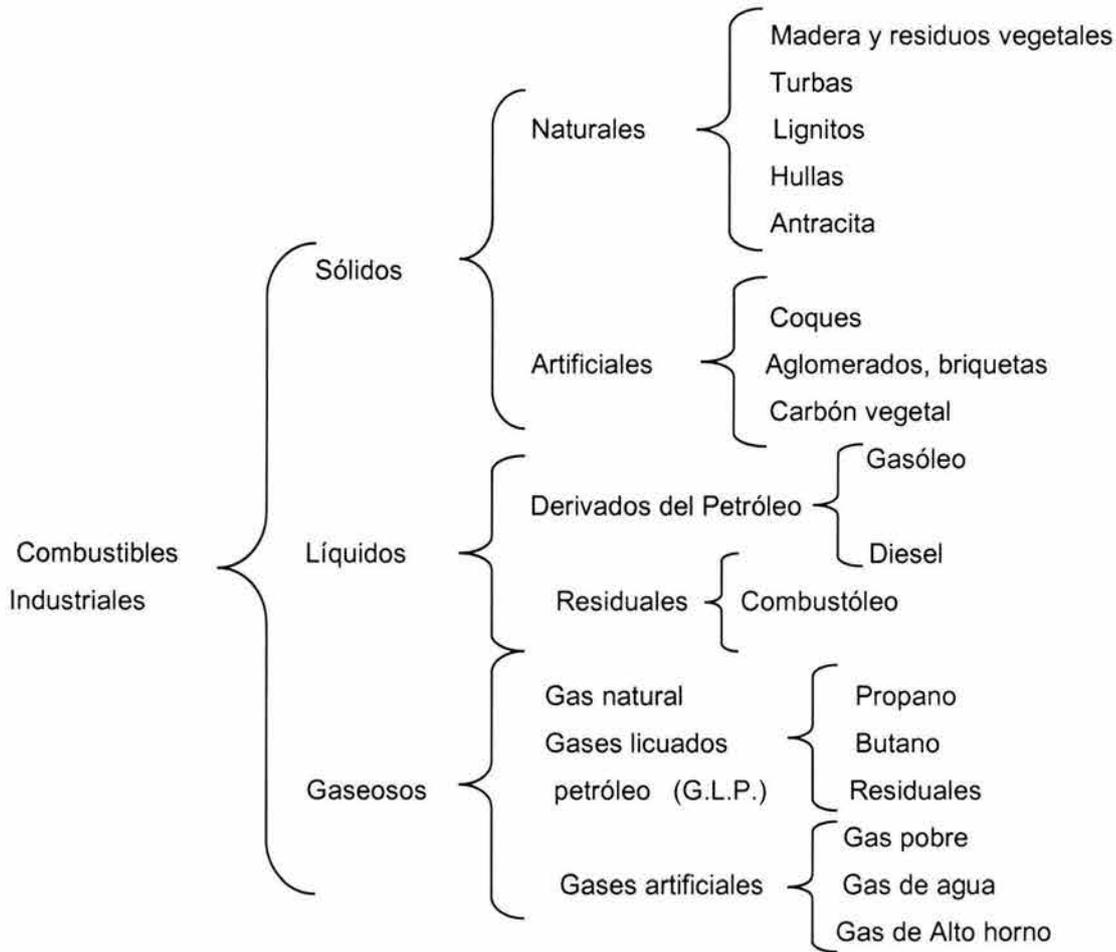
Los combustibles líquidos presentan particulares ventajas sobre los combustibles sólidos debido a que pueden fluir por los oleoductos y pueden fácilmente ser transportados y utilizados. Los combustibles líquidos más utilizados e importantes son aquellos derivados del petróleo y en menor escala algunos alcoholes.

El petróleo crudo tal como se halla en el subsuelo, ha de someterse a una serie de procesos de refinamiento con el propósito de obtener un gran número de productos derivados. Este líquido tan apreciado en nuestros días, es una mezcla de muchos compuestos diferentes cuyas moléculas están formadas por carbono e hidrógeno, razón por la cual a todos estos compuestos se les denomina hidrocarburos.

Los diferentes tipos de hidrocarburos se obtienen por el método de destilación del petróleo crudo, es así como se consiguen una gran cantidad de productos derivados cada uno con aplicaciones especiales. Ejemplos de estos productos son los asfaltos, parafinas, lubricantes, diesel, gasolinas, etc.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES.

Los combustibles normalmente utilizados en la industria pueden clasificarse atendiendo a su naturaleza, de la siguiente forma:



Esquema 1.1 Clasificación de los combustibles

A continuación se señalan algunas características de los mismos:

1.2.1 Madera y residuos vegetales

La madera no presenta un gran interés en la industria como combustible. Sin embargo, si se le calienta en ausencia de aire, se obtiene el carbón de madera, utilizado como absorbente en la industria química y como reductor en la metalurgia.

Los combustibles residuales agrícolas son muy numerosos aunque su consumo está limitado a las industrias que los generan o ha zonas concretas, destacan por su importancia el orujillo de aceituna, el orujo de la vid, las cáscaras de frutos secos y el bagazo. Todos ellos se consumen en hogares especialmente diseñados para su combustión.

1.2.2 Turbas

Son masas fibrosas de materia vegetal parcialmente descompuesta, que se han acumulado en lugares inundados de agua. Generalmente se utiliza localmente como combustible pobre.

1.2.3 Lignitos

Bajo esta denominación se engloban muy diversos tipos de carbones, aunque suelen agruparse en dos categorías: lignitos pardos y lignitos negros. Suelen consumirse en centrales térmicas situadas a pie de mina.

1.2.4 Hullas

Son los carbones que presentan un mayor interés, tanto como portadores de energía como por ser materia prima en la industria química y metalúrgica. Existen numerosas clasificaciones de las hullas, motivado por los amplios límites en que se mueven sus características.

1.2.5 Antracita

Es el carbón más duro y denso, tiene un Poder Calorífico elevado. Fuera de su combustión directa se utiliza para aplicaciones metalúrgicas y de gasificación.

1.2.6 Combustibles sólidos artificiales

Se obtienen fundamentalmente al someter a un combustible sólido a la acción del calor sin contacto con el aire. Se quema en casos muy específicos normalmente ayudando como reductores al proceso. Exclusivamente como combustibles solamente se utilizan cuando son subproductos en la fabricación de gas.

1.2.7 Gasóleo y Diesel

Son combustibles líquidos obtenidos en la destilación del petróleo o como residuos de este proceso.

1.2.8 Combustibles líquidos residuales

Se obtienen en algunos procesos industriales, como en la fabricación de papel, realizándose su combustión en hogares especiales en la propia fábrica.

1.2.9 Gas natural

El gas natural se encuentra en yacimientos similares a los del petróleo, al que acompaña frecuentemente. Su componente principal es el metano. Formando una mezcla con éste se encuentra etano, propano y butano además de otros compuestos. Las proporciones de cada componente son variables.

1.2.10 Gas licuado del petróleo (G.L.P.)

El gas licuado se obtienen en las operaciones de refinado del petróleo. Se venden en botellas o camiones cisterna en forma líquida. El propano, debido a su mayor presión y poder calorífico, se emplea principalmente en la industria y el butano para usos domésticos.

1.2.11 Gases residuales del refinado del petróleo

Después de separar el butano y propano quedan unos gases que no pueden transformarse económicamente en gasolinas u otros productos. Su composición varía ampliamente según el proceso de refinado seguido.

1.2.12 Gas pobre, gas de agua y gas de alto horno

Se obtienen gasificando por aire o mezcla de aire y vapor de agua, coque o carbón. Son mezclas de óxido de carbono e hidrógeno.

1.3 TIPOS DE COMBUSTIBLES

Los combustibles usados en México en calderas y generadores de vapor son: Combustóleo, Diesel, gas natural, gas L.P. y carbón combustible.

1.3.1 Combustóleo

El combustóleo es un combustible pesado que procede de los residuos obtenidos de la refinación del petróleo crudo.

Este combustible es probablemente el de mayor uso en calderas y generadores de vapor en México, tanto en la industria en general como en el sector eléctrico y petrolero. Sus desventajas importantes son su alto contenido de azufre y vanadio, los cuales son dañinos desde los puntos de

vista del deterioro del equipo y del medio ambiente. En las denominadas zonas metropolitanas del país se ha prohibido su uso por cuestiones de tipo ecológico y ha sido sustituido el combustóleo por otros combustibles de muy poca oferta, como el gas natural.

Debe entenderse que la composición del combustóleo varía de región a región, razón por la cual debe llevarse un registro local de sus características. Con ello, los equipos deben cambiar su comportamiento termodinámico al operar con diferentes composiciones. En la Tabla 1.1 se dan algunos datos de laboratorio del combustóleo.

Tabla 1.1 Composición del Combustóleo

Composición másica

Azcapotzalco (benigno)	Minatitlán
C = 85.73%	C = 82.80%
H ₂ = 10.72%	H ₂ = 10.40%
S = 3.50%	N ₂ = 2.97%
H ₂ O = 0.03%	O ₂ = 0.20%
O ₂ = 0.02%	S = 2.93%
	Z = 0.40%
	w=0.30%
	PCI = 46 298 KJ/kg

Valores estadísticos de propiedades del Combustóleo según PEMEX

Carbón (C) = 84.9% +/- 1.1	cenizas (Z) =0.05 +/- 0.01
Hidrógeno (H ₂) = 10.9% +/- 0.7	Vanadio ppm =184
Nitrógeno(N ₂) = 0.41% +/- 0.10	PCI = 42 412 KJ/kg
Azufre (S) = 3.4 +/- 0.40	Temperatura de inflamación =95 °C +/- 12

1.3.2 Combustible Diesel

Este combustible es ampliamente usado en calderas de pequeña y mediana capacidad, dadas sus características, el combustible diesel es de fácil manejo y su proceso de quema (combustión) resulta muy controlable con respecto del Combustóleo.

En su composición estadística media se puede observar su bajo contenido de azufre y un mayor contenido de humedad; sin embargo, difiere muy levemente respecto del Combustóleo, en su poder calorífico. Seguramente por ello, se ha adoptado el uso de una mezcla de combustibles denominada Gasoleo, la cual tiene una proporción másica de:

$$80 \% \text{ Diesel} \quad 20 \% \text{ Combustóleo}$$

Con ello se propicia una mejor combustión que cumple con los estándares ecológicos. Además de ser un combustible barato. En la Tabla 1.2 se ilustra la composición de un Diesel típico.

Tabla 1.2 Características del combustible diesel

Composición másica

C = 84.60%	N ₂ = 1.00%	Temperatura de escurrimiento:
H ₂ = 9.70%	W = 1.50%	0°C Nov. a Feb.
S = 2.70%	O ₂ = 0.0%	5 °C Mar. a Oct.
Z = 0.50%	Temperatura de auto encendido = 52 °C	PCI (medio) = 44 790 kJ/kg

1.3.3 Gas Natural

Este combustible gaseoso es muy utilizado en el ámbito de calderas y generadores de vapor debido a que propicia una correcta combustión al no poseer azufre ni cenizas.

El motivo por el cual no se hace extensivo su uso es porque su oferta es muy limitada, y se vende solamente en determinadas zonas del país.

El gas natural está compuesto básicamente por metano, etano, bióxido de carbono y otros gases; es obvio que sus composiciones varían en función del yacimiento. En seguida se dan en la Tabla 1.3 datos de la composición de gas natural en diferentes zonas:

Tabla 1.3 Características del Gas Natural

	Composición molar
Cadereyta, N. L.	Petroquímica Camargo
H ₂ = 10.80%	CH ₄ = 83.32%
CH ₄ = 76.30%	C ₂ H ₆ = 9.40%
CO ₂ = 0.60%	C ₃ H ₈ = 2.30%
C ₂ H ₆ = 6.00%	C ₄ H ₁₀ = 0.40%
C ₂ H ₄ = 2.30%	C ₅ H ₁₂ = 0.30%
C ₃ H ₈ = 0.10%	CO ₂ = 0.69%
C ₃ H ₆ = 0.70%	H ₂ + Ar = 3.59%
otros = 3.20 %	
Datos adicionales:	
H ₂ S = 17 ppm	
PCI = 35 755 kJ/m ³ (promedio a condiciones estándar)	

1.3.4 Gas L.P.

Este gas combustible tiene su mayor uso para aplicaciones domésticas, aunque algunas industrias ya lo ocupan para calderas y generadores de vapor. Su uso resulta también atractivo debido a su alta eficiencia de combustión y su poder calorífico alto.

Se compone básicamente de gases simples como propano y butano. Su composición exacta la proporciona la planta que lo destila.

La Tabla 1.4 indica un análisis cromatográfico de un gas L.P. de la Zona Metropolitana de la Cd. de México.

Tabla 1.4 Composición detallada de Gas L.P.

Composición másicas			
Etano CH_4	0.02%	Etano + etileno C_2H_6	0.44%
Propano C_3H_8	45.57%	Propileno C_3H_6	0.05%
iso - Butano C_4H_{10}	14.11%	n - Butano C_4H_{10}	34.25%
Buteno C_4H_8	0.37%	iso - Buteno C_5H_{10}	0.06%
iso - Pentano C_5H_{12}	2.82%	otros	2.31%

1.4 ELECCIÓN DE UN COMBUSTIBLE

La elección de un combustible para un proceso particular viene condicionada por diversos factores, fundamentalmente:

- Las propias peculiaridades del proceso o producto a obtener.
- La ubicación geográfica de la fábrica.
- Las posibilidades de aprovisionamiento de un determinado combustible.
- El precio del mismo.
- Los problemas ambientales que pueden derivarse de su uso.

Normalmente un operador poco o nada puede influir en la elección. El combustible está en la fábrica y su misión será conseguir una utilización lo más eficientemente posible del mismo.

1.5 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES

Dado que normalmente los combustibles se compran de acuerdo con unas especificaciones que limitan sus propiedades, es necesario conocer al detalle éstas, con el objeto de comprobar que se cumplen las especificaciones indicadas por el proveedor.

A continuación se estudiarán por separado los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Dentro de los combustibles sólidos se hará fundamentalmente referencia a los carbones, debido al limitado mercado de los demás.

En la tabla 1.5 se señalan algunos de los combustibles sólidos más comunes:

Tabla 1.5 COMBUSTIBLES SÓLIDOS

COMBUSTIBLE	MASA MOLECULAR	PODER CALORIFICO	
		kJ/kg	
		Inferior	Superior
Antracita		31 000	31 493
Carbón bituminoso		30 471	31 631
Carbón grafitico	12.01	9 211	32 791
Coque de horno		28 960	29 144
Lignito		15 583	17 094
Azufre	32.02	9 257	9 257
Madera de roble		18 606	18 606

1.5.1 Propiedades del Carbón

Las propiedades del carbón nos ayudan a determinar sus características, para su correcta selección y combustión; entre las principales propiedades encontramos su poder calorífico, análisis inmediato, análisis elemental, entre otros.

1.5.1.1 Poder Calorífico del Carbón

El poder calorífico de un combustible es su calor de combustión referido a la unidad de masa, que en la práctica industrial suele ser el kilogramo.

La determinación del poder calorífico se lleva a cabo en una bomba calorimétrica.

Como en la bomba calorimétrica los productos de la combustión quedan a temperatura ambiente, el vapor de agua formado se condensará cediendo su calor latente de condensación al agua del calorímetro.

En la práctica industrial el agua no se condensa, por tanto el poder calorífico en estas condiciones será menor que el determinado en el calorímetro.

Por la razón anterior se establece el concepto de poder calorífico superior (vapor de agua condensado) y poder calorífico inferior (agua en estado de vapor).

El poder calorífico inferior es el que mejor representa las condiciones industriales, es decir el valor real de un combustible.

La diferencia entre el poder calorífico superior e inferior aumenta con el contenido en hidrógeno respecto al peso molecular total del combustible.

El calor cedido al agua en la condensación del vapor es igual a 2499.88 kJ/kg de agua formada. Además debe recordarse que un gramo de hidrógeno da lugar a 9 gramos de H₂O.

Una fórmula que tiene en cuenta el agua contenida en el carbón como humedad es la siguiente:

$$PCI = PCS - 5.85 (9 * \% H + \% humedad)$$

O lo que es lo mismo:

$$PCI = PCS - 5.85 (\% H_2O total)$$

Existen una serie de fórmulas empíricas para determinar el poder calorífico de un carbón, a las que se atribuye un error no superior al 1.5 % y que están basadas en el análisis elemental del combustible, referido a la base seca.

La más conocida es la de Dulong:

$$PCS = 80.8 (\%C) + 344 (\%H_2 - \%O_2/8) + 22.2 (\%S) \text{ kcal/kg carbon}$$

1.5.1.2 Análisis Inmediato

El carbón no es una sustancia pura ni tiene una composición uniforme, por tanto no se le podrá dar una fórmula química definida.

En el análisis inmediato se incluyen los porcentajes en peso de los siguientes componentes:

- Humedad.
- Cenizas (derivadas de las impurezas minerales).
- Materias volátiles (gases y vapores obtenidos por la acción del calor).
- Carbono fijo.

Este análisis se emplea para caracterizar los carbones según sus aplicaciones industriales.

1.5.1.2.1 Humedad

El agua está presente siempre en el carbón. Puede permanecer ocluida en los poros, combinada químicamente o tener un contenido superficial adquirido en el lavado, transporte y almacenamiento.

El agua superficial desaparece mediante secado al aire a la temperatura ambiente; ó calentando a poco más de 100 °C desaparece totalmente. Se suele denominar a está, agua de imbibición.

El agua retenida en los poros del carbón no se evapora y es necesaria una temperatura algo mayor para eliminarla (en algunos carbones, ciertas pérdidas de peso entre 100 y 185 °C se deben a la pérdida de agua de constitución higroscópica).

El secado a altas temperaturas debe realizarse en atmósfera de nitrógeno para evitar la auto combustión del carbón.

La relatividad del concepto humedad de un carbón, viene marcada por las dificultades en su determinación y los resultados variables en los distintos métodos para obtenerla.

En la combustión, al evaporarse el agua contenida en el carbón, se produce una pérdida de calor que se escapa con los productos de la misma.

Por ejemplo supongamos que disponemos de una muestra de carbón de 10 kg y después de secada al aire pesa 8 kg. De estos 8 kg de carbón seco tomamos 1.25 g y los introducimos en una estufa de secado reduciéndose en la misma a 1.22 g. La humedad total del carbón será la suma del agua evaporada al aire, que es la humedad superficial y la eliminada en la estufa, que es el agua contenida en los poros.

Agua perdida al secar al aire:

$$10 \text{ kg (carbón húmedo)} - 8 \text{ kg carbón seco al aire} = 2 \text{ kg de agua}$$

$$\text{Humedad superficial \%} = \frac{(2\text{kg} - \text{de} - \text{agua}) * 100}{10\text{kg} - \text{carbón} - \text{húmedo}} = 20\%$$

Agua perdida en la estufa:

$$1.25 \text{ g (carbón + humedad en poros)} - 1.22 \text{ carbón seco} = 0.03 \text{ g agua}$$

$$\text{Humedad en los poros \%} = \left(\frac{0.03\text{g}}{1.25} \right) * 100 = 2.4\% , \text{ referido a los 8 kg de carbón secado al aire}$$

Es necesario hacer constar que el porcentaje de humedad se refiere siempre a la muestra húmeda. Por tanto la humedad en los poros se referirá a los 10 kg de carbón inicial, es decir:

$$\text{Humedad en los poros} = 2.4\% * \frac{8\text{kg} - \text{carbón} - \text{secado} - \text{al} - \text{airea}}{10\text{kg} - \text{carbón} - \text{base} - \text{humeda}} = 1.92\%$$

La humedad total será la suma de ambas:

$$\text{Humedad total} = 20\% + 1.92\% = 21.92\%$$

1.5.1.2.2 Cenizas

El carbón contiene siempre materias minerales de diversas procedencias, de la roca adyacente, propia del carbón, de las combinaciones orgánicas o inorgánicas de los vegetales, y de la materia mineral formada al mismo tiempo que el carbón.

Las cenizas reducen el poder calorífico del combustible y su eliminación de los hogares resulta costosa. Ambos factores están en relación directa a la cantidad de cenizas existentes.

El rendimiento térmico de un horno o caldera disminuye debido a que las cenizas y escorias dificultan la transmisión de calor, reduciendo la cantidad de calor que podría extraerse de un carbón.

Las cenizas de un carbón se funden a temperaturas relativamente bajas formando escorias que son perjudiciales para los refractarios y dan origen a un costo adicional de extracción.

La necesidad de limpieza y mantenimiento de hogares y calderas se verá incrementada con el aumento en el porcentaje de cenizas.

Si se quema el carbón en hogares de parrilla, además de las consideraciones anteriores, las cenizas reducen el tiro, causan una combustión irregular y pueden estropear la parrilla si se produce escoria en cantidad suficiente.

Sólo en ciertos procesos industriales, como la fabricación de cemento, si el carbón es de buena calidad, y aproximadamente con un 15% de cenizas, no resultan tan perjudiciales, ya que la ceniza es absorbida por la carga y reacciona con ella.

1.5.1.2.3 Materias volátiles

Las materias volátiles están constituidas por combinaciones de carbón, hidrógeno y otros gases. El contenido en volátiles se determina pesando dos muestras las cuales se colocan en crisoles hondos con tapas dentro de un horno a 954 °C durante 7 minutos, se sacan y se enfrían. En este caso, las pérdidas de peso se deben a la pérdida de agua y sustancias volátiles. Una vez determinada la humedad, las sustancias volátiles se encuentran por diferencia.

El contenido en volátiles determina la longitud de la flama al quemar carbón pulverizado. Por ejemplo, si se quema carbón de hulla en un horno de cemento, interesa que el contenido en materias volátiles se sitúe alrededor del 18-22 %, con el objeto de tener la longitud de flama necesaria para que se alcance toda la zona de clinquerización.

En principio se podría esperar un aumento del poder calorífico con un incremento en el contenido en volátiles. Esto sucede hasta un contenido en volátiles del 20% aproximadamente. Para contenidos más elevados el poder calorífico decrece, debido a que una parte de las materias volátiles está formada por combinaciones de oxígeno y nitrógeno no combustibles.

1.5.1.2.4 Carbón fijo

Se determinará por diferencia a 100 de los porcentajes de humedad, cenizas y materias volátiles. Es decir:

$$\text{Carbón fijo} = 100 - \text{Humedad} - \text{Materias Volátiles} - \text{Cenizas}$$

1.5.1.3 Análisis Elemental de un Carbón

El análisis elemental trata de determinar el contenido en elementos simples de un carbón, pero solamente de aquellos que se gasificarán y/o supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión. Éste se efectúa en base seca.

Estos elementos se expresan en porcentajes en peso y son:

- Carbón total
- Hidrógeno
- Azufre
- Nitrógeno
- Oxígeno
- Cenizas

1.5.1.3.1 Carbón Total

El carbón procede de las sustancias orgánicas y de los carbonatos minerales.

Será la suma del carbón fijo y del contenido en las materias volátiles. El carbono fijo, o carbón sin combinar, como ya se ha indicado, es el que no se destila cuando se calienta un carbón.

1.5.1.3.2 Hidrógeno

El hidrógeno está presente en las sustancias orgánicas en forma de humedad y en el agua que constituye a los silicatos en las materias minerales. El análisis químico descompone el agua en hidrógeno y oxígeno.

1.5.1.3.3 Azufre

La mayoría de los carbones contendrán azufre, que únicamente puede determinarse por análisis químico.

El azufre está presente en tres formas:

- Compuestos sulfurosos orgánicos
- Pirita o marcasita
- Sulfatos inorgánicos

La presencia del azufre en forma de pirita ocasionará problemas en la molienda del carbón, dada la abrasividad de ésta.

El azufre sólo tiene su plena potencia calorífica cuando se encuentra en estado libre. En porcentajes elevados podrá formar escorias muy perjudiciales.

Durante la combustión, el azufre como impureza forma óxidos, que corroen piezas de los hornos y calderas, siendo además sus emisiones a la atmósfera contaminantes.

1.5.1.3.4 Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en todos los carbones, ligado a combinaciones orgánicas, en pequeños porcentajes.

Al ser inerte no produce ningún efecto perjudicial, excepto que obliga en su manipulación a gastar energía. Al igual que las cenizas, disminuye la cantidad de energía disponible por tonelada de combustible.

1.5.1.3.5 Oxígeno

El contenido en oxígeno se estima por diferencia a 100 de la suma de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre total y cenizas.

El oxígeno disminuye la potencia calorífica del combustible, aunque contribuye a las necesidades del aire de combustión.

El resultado del análisis elemental se presenta en la tabla 1.6

Tabla 1.6 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL CARBÓN

Análisis elemental	Muestra seca %	Carbón puro %
Carbono	83.46	85.86
Hidrógeno	4.73	4.59
Nitrógeno	1.55	1.59
Azufre total	0.58	0.59
Ceniza	2.80	-----
Oxígeno	6.88	7.08
Total	100.0	99.71

1.5.1.4 Determinación de la Materia Mineral

Para determinar la materia mineral presente en un carbón se calculan los contenidos en cenizas y azufre, haciendo las correcciones debidas o los cambios que tienen lugar en estos durante la combustión. La fórmula empleada para esto es la de Parr. Materia mineral = % humedad + 1.08 (% cenizas) + 0.55 (% azufre). La humedad, las cenizas y el azufre representan los porcentajes hallados por análisis del carbón.

1.6 EXPRESION DE LOS RESULTADOS DE UN ANALISIS EN DISTINTAS BASES

La mayoría de las determinaciones de un análisis se realizan en un laboratorio secando la muestra hasta su equilibrio con la atmósfera del laboratorio. En estas condiciones los resultados se dan con base en aire seco.

En ciertos casos pueden resultar más conveniente y significativo expresar los resultados corrigiendo a otras bases. Es decir:

- Referido a tal como se recibe
- Referido a base seca
- Referido a base seca y sin cenizas
- Referido a base seca y sin materia mineral

1.7 RELACION ENTRE EL CARBÓN, EL HIDRÓGENO, LA MATERIA VOLÁTIL Y EL PODER CALORÍFICO

De forma bastante aproximada se puede calcular el poder calorífico de un carbón a partir de los porcentajes de carbón e hidrógeno hallados en el análisis elemental, empleando la fórmula de Dulong a la que ya se ha hecho alusión:

$$P.C.S. = 80.8 * [\%C] + 344 * \left([\%H] - \left[\frac{\%O_2}{8} \right] \right) + 22.2 * [\%S] \quad (\text{kcal /kg})$$

Esta fórmula es suficiente para fines prácticos.

La relación entre materias volátiles y análisis elemental es la siguiente:

$$[\% M.V.] = 10.61 [\% H] - 1.24 [\% C] + 84.15$$

A partir de las materias volátiles y el poder caloríficos se puede determinar los porcentajes de hidrógeno y carbón.

$$[\%H] = 0.069 * \left(\frac{P.C.S.}{100} + [\%M.V.] \right) - 2.86$$

$$[\%C] = 0.59 * \left(\frac{P.C.S.}{100} - 1.1 * \left[\frac{\%M.V.}{3} \right] \right) + 43.4$$

1.8 PROPIEDADES FÍSICAS DEL CARBÓN

1.8.1 Abrasividad

La abrasividad viene marcada por las impurezas más que por el carbón mismo. Como elementos más abrasivos se encuentra la piritita, sílice y arenisca, que podrán acompañar al carbón según su naturaleza.

Es una propiedad que tiene una gran importancia económica, ya que los elementos abrasivos que acompañan al carbón pueden influir notablemente en el desgaste de las piezas metálicas de tolvas, molinos, conductos, quemadores, etc.

1.8.2 Cohesión, friabilidad y fragilidad

Marcan la degradación, es decir paso a granulometrías menores por impacto o rozamiento.

1.8.3 Molturabilidad o grindabilidad

Es una propiedad que marca la facilidad con la cual puede pulverizarse un carbón, para su uso en quemadores.

La Ley de Rittinger es la medida de la triturbabilidad (el aumento de superficie al moler es directamente proporcional a la energía empleada).

En general, la molturabilidad depende básicamente del contenido en volátiles del carbón.

1.8.4 Finura de molienda

La finura de molienda se valora haciendo pasar una muestra de carbón pulverizado por un tamiz de un determinado ancho de malla. El residuo en el tamiz se denomina rechazo y se expresa en tanto

por ciento del peso total de la muestra. La finura óptima de la molienda depende del contenido en materias volátiles del carbón.

El tamiz normalmente usado para el carbón pulverizado es el DIN 0.09 que tiene un ancho de malla interior de 90 micras.

1.9 CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Las características de los combustibles líquidos nos proporcionan las propiedades fundamentales para poder seleccionar y analizar un combustible; estas pueden ser del tipo físico o del tipo químico.

1.9.1 Propiedades Físico-Químicas de los Combustibles Líquidos

1.9.1.1 Densidad

La densidad se define por el cociente entre la masa de un cierto volumen de combustible líquido y dicho volumen, a una determinada temperatura.

Salvo que se especifique lo contrario, cuando se habla de la densidad de un combustible líquido deberá entenderse que se refiere a la que presenta el producto a 15°C y a la presión atmosférica (760 mm Hg).

La densidad de un combustible en estado líquido se determina fácilmente, cualquiera que sea la temperatura a que se encuentre, con auxilio de un densímetro de los que existen numerosas marcas y modelos en el mercado.

La densidad es función de la temperatura y presión del líquido.

La densidad de un combustible líquido, a 15 °C, puede relacionarse con otras características, mediante fórmulas de equivalencia que conducen a resultados lo suficientemente aproximados desde el punto de vista práctico.

Así, el poder calorífico superior de un combustible líquido (P.C.S.), expresado en kcal/kg depende de la densidad relativa (d) según la fórmula

$$P.C.S. = 12\,400 - 2\,100 d^2$$

El contenido en hidrógeno (H %), expresado en tanto por ciento del peso total del combustible, se puede relacionar con su densidad (d) mediante la ecuación:

$$H \% = 25 - 15 d$$

El volumen de aire necesario para la combustión (V.A.), en condiciones estequiométricas, expresado en m³ por kg de combustible (promedio a condiciones estándar), depende asimismo de la densidad relativa del líquido, según la relación aproximada.

$$V.A. = \frac{12400 - 2100d^2}{748}$$

El calor específico de un combustible líquido a presión constante (Cp), a una determinada temperatura (t °C), expresado en kcal/kg, en función de la densidad y de la temperatura, es:

$$Cp = \frac{1}{\sqrt{d}} (0.403 - 0.0009t)$$

Aunque la densidad de un combustible líquido depende de la presión, los coeficientes de compresibilidad son tan reducidos que sus efectos sobre la misma pueden ser despreciados en los problemas prácticos.

1.9.1.2 Viscosidad

La viscosidad es la medida física de la resistencia que opone un líquido a fluir cuando se le aplica una fuerza exterior. Por ejemplo, la presión producida por una bomba o por el líquido contenido en un camión o vagón cisterna que se descarguen por gravedad.

Sin duda alguna, la viscosidad es una de las características más importantes de un combustible en lo que se refiere a su almacenamiento, transporte y utilización.

La viscosidad se mide en unidades físicas o prácticas.

Entre las primeras se encuentran: la viscosidad absoluta ó dinámica y la cinemática, cuyas unidades, en el Sistema Internacional son:

Viscosidad cinemática	m^2/s
Viscosidad dinámica	$N s/m^2 = Pa s$

La viscosidad cinemática se obtiene dividiendo la dinámica entre la densidad del combustible. La viscosidad dinámica se representa, generalmente, por la letra del alfabeto griego μ (mu), en tanto que para la cinemática se utiliza comúnmente la ν (nu).

Las determinaciones exactas de las viscosidades de los combustibles han de realizarse en laboratorios especializados.

Además de las unidades indicadas, existen otras para reflejar la viscosidad.

La viscosidad de un combustible líquido varía intensamente con su temperatura y resulta poco sensible, por otra parte, a oscilaciones moderadas en la presión; cuyos efectos pueden despreciarse en la mayoría de los problemas prácticos.

Por desgracia, no se han formulado hasta el presente leyes aplicables a cualquier tipo de combustible líquido que relacionen directamente la viscosidad con la temperatura del producto. La dificultad de establecer este género de fórmulas obedece a la heterogeneidad de los combustibles residuales y de mezclas y a su tendencia a comportarse como suspensiones o semilíquidos por debajo de determinadas temperaturas.

La ASTM ha publicado una carta o diagrama (D 341) de gran utilidad que permite, conociendo las viscosidades de un combustible a dos temperaturas diferentes, determinar, con suficiente aproximación, la que presentaría a temperaturas intermedias a aquellas a las que se efectuaron las medidas.

1.9.1.3 Fluides crítica

Indica la temperatura mínima a que un combustible es trasegable (transferible) y por tanto sirve de base para el cálculo de aislamientos y calentamientos de depósitos y tuberías en las zonas que lo requieran de acuerdo con las condiciones atmosféricas previsibles.

1.9.1.4 Inflamabilidad

El punto de inflamación o inflamabilidad de un combustible líquido da una indicación sobre el valor de la temperatura a la cual el producto, emite suficientes vapores para que pueda inflamarse la mezcla aire-gases provocada por el calentamiento del fluido.

Se admite generalmente que los distintos combustibles líquidos pueden manipularse, sin grave riesgo de explosión o incendio, siempre y cuando permanezcan a temperaturas inferiores a las correspondientes a sus puntos de inflamación.

Desde el punto de vista de la seguridad del almacenamiento, puede considerarse que tanto el gas-oil como los diversos tipos de fuel-oil, son productos poco peligrosos, porque sus puntos de inflamación son del orden de 65-70 °C, muy superiores a las temperaturas de almacenamiento.

1.9.1.5 Residuo carbonoso o cok Conradson

El residuo carbonoso se define como el peso del cok y cenizas minerales que resultan en la destilación de un cierto volumen del combustible líquido, aplicando aparatos y normas operativas rigurosamente especificadas.

El cok Conradson ofrece un notable interés cuando se han de utilizar los pequeños aparatos o estufas de vaporización, que emplean destilados puros, y que resultan muy sensibles al residuo carbonoso. En estos casos, los valores superiores al 0.05% en el 10% del residuo, son inadmisibles.

En lo que se refiere a los quemadores de combustibles líquidos a pulverización mecánica o neumática el índice de Conradson proporciona una indicación u orientación valiosa sobre la tendencia a formar combustibles no quemados o ha obturar las boquillas de los chiclors.

Un residuo carbonoso superior al 6% dificultará sensiblemente el funcionamiento de las instalaciones térmicas de reducida o mediana potencia, más el de las primeras que el de las segundas y repercutirá en una elevación apreciable en los gastos de mantenimiento y se traducirá en un mayor riesgo de fallas.

Los índices elevados en el cok Conradson dan una orientación significativa sobre la tendencia a crackizar de un fuel-oil en los precalentamientos anteriores a su combustión, imponen restricciones severas a su aplicación y delimitan, finalmente, el dominio de las potencias térmicas en las que puede emplearse racionalmente un determinado combustible líquido.

En la literatura técnica, e incluso en las especificaciones oficiales, se dan con frecuencia los valores del residuo carbonoso en dos unidades de medida diferentes: el cok Conradson y el Ramsbotton.

1.9.1.6 Contenido en azufre

La determinación del contenido en azufre de una muestra es importante debido a que los compuestos sulfurados son malolientes y corrosivos.

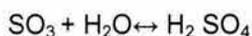
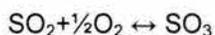
Durante la combustión, se desprende en forma de SO₂, que por oxidación e hidratación da ácido sulfúrico, que es un contaminante peligroso y además un compuesto fuertemente corrosivo.

1.9.1.7 El contenido de cenizas

El contenido en cenizas es el residuo de la combustión de un producto. En las cenizas se encontrarán presentes los sedimentos minerales y los óxidos de jabones metálicos solubles en el combustible o en las gotitas de agua que los pueden arrastrar y contener en emulsión o suspensión.

Un elevado contenido en cenizas se traducirá en el mayor desgaste de los órganos de las instalaciones, principalmente bombas.

Pero con independencia de sus perjudiciales efectos mecánicos, las cenizas pueden contener compuestos de vanadio, sodio, potasio y calcio que a partir de temperaturas relativamente reducidas de las paredes metálicas de las calderas originan corrosiones fuertes. Por otra parte, parece estar confirmado que los compuestos de vanadio actúan como catalizadores en las reacciones:



Desplazando el equilibrio hacia la derecha, provocando la formación del ácido sulfúrico, y aumentando la agresividad de los gases de combustión.

El contenido en cenizas es más significativo, cuando se completa con un análisis químico cuantitativo de sus componentes.

1.9.1.8 Contenido en agua y sedimentos

El agua, en forma de minúsculas gotas, y otros tipos de impurezas, se encuentran en suspensión en todos los combustibles líquidos y particularmente en los residuales.

El contenido en sedimentos de un combustible líquido se determina disolviendo su matriz hidrocarburada en benzol, filtrando la disolución y pesando las impurezas retenidas por un filtro.

Mucho más importante y significativo que el contenido total en impurezas del combustible resulta ser, para los fines de su utilización, el conocimiento de su composición química y la clasificación granulométrica de las mismas.

Si las partículas extrañas están constituidas fundamentalmente por granitos de sílice ó de óxido de hierro, la circulación del combustible por órganos tan delicados como las bombas de desplazamiento positivo, llevará consigo un rápido desgaste de estos elementos. Si, por el contrario, los sedimentos están compuestos por partículas blandas, su acción dentro de ciertos límites, no resultará apreciablemente nociva.

Los efectos del agua contenida en un combustible líquido dependen fundamentalmente de la forma en que se halle presente. Si las gotas de agua dispersas en el fluido son de diámetros tales que su decantación es rápida, a las temperaturas que alcanza el combustible en el precalentador del quemador, su presencia a partir de porcentajes del orden del 1 %, puede provocar irregularidades apreciables en el funcionamiento del quemador y en la estabilidad de la flama.

Por el contrario, si las gotitas de agua emulsionadas en el combustible no son susceptibles de decantar, porque sus diámetros son muy reducidos y las necesidades de calentamiento no muy pronunciadas, porcentajes relativamente importantes, del 10 o el 15%, no ejercen una influencia perjudicial apreciable durante el funcionamiento del quemador, desde el punto de vista mecánico.

En la tabla 1.7 se presentan algunos de los combustibles líquidos más importantes, incluyendo otros cuyo origen no es el petróleo.

Tabla 1.7 COMBUSTIBLES LIQUIDOS

COMBUSTIBLE	FORMULA	PESO MOLECULAR	PODER CALORIFICO kJ/kg	
			Inferior	Superior
Benceno	C ₆ H ₆	78.108	40 143	41 834
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	142.276	44 241	47 641
n-Do decano (Diesel)	C ₁₂ H ₂₆	170.328	44 116	47 474
Alcohol etílico	C ₂ H ₆ O	46.068	27 746	30 614
Combustible Diesel			43 032	45 820
Gasolina			43 727	46 984
n - Heptano	C ₇ H ₁₆	100.198	44 560	48 073
n – Hexadecano	C ₁₆ H ₃₁	226.432	43 957	47 260
Queroseno			43 032	46 285
Alcohol metílico	CH ₄ O	32.042	21 114	23 860
Nonato	C ₉ H ₂₀	128.250	44 326	47 754
n – Octano	C ₈ H ₁₈	114.224	44 426	47 893
Octeto	C ₈ H ₁₆	112.208	44 192	47 332
n – Pentano	C ₅ H ₁₂	72.146	44 983	48 646

1.9.2 Poder Calorífico de los Combustibles Líquidos

Partiendo del análisis elemental de un combustible líquido derivado del petróleo, se puede obtener el poder calorífico inferior con la fórmula:

$$P.C.I. = 12\,125 - 292 C/H - 7\,000 (\%S)$$

En donde C/H es la relación del carbono entre el hidrógeno, y S el contenido en azufre, en decimal.

Y como en estos combustibles se puede decir que:

$$d = 0.25 + 0.0913 C/H \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Siendo «d» la densidad del combustible a 15°C, se puede también escribir:

$$P.C.I = 12\,925 - (3\,200)d - 7\,000 (\%S)$$

La determinación del poder calorífico superior e inferior de los combustibles líquidos se realiza de acuerdo con los métodos recomendados por el Technical Data Book del American Petroleum Institute (API.).

Actualmente, los combustibles líquidos tienen especificado el poder calorífico mínimo, en los siguientes valores:

Tabla 1.8 PODER CALORÍFICO MÍNIMO PARA CIERTOS COMBUSTIBLES.

COMBUSTIBLE	P.C.S.(kcal/kg)	P.C.I. (kcal/kg)
Gasoleo	10 300	Sin especificar
Diesel n°.1	10 200	9 700
Diesel n°.2	10 000	9 500

La norma para esta determinación es la A.S.T.M. D-240.

1.10 PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Las propiedades importantes para los combustibles gaseosos son aquellas que están directamente relacionadas con el volumen. Entre ellas podemos encontrar el poder calorífico densidad, etc.

1.10.1 Poder Calorífico de los Combustibles Gaseosos

El poder calorífico de un gas es el calor liberado por la unidad de volumen de gas. Se suele expresar en kJ/m^3 de gas en condiciones normales (0°C y 760 mm Hg de presión).

Es necesario recordar que en los combustibles sólidos y líquidos el poder calorífico se da en kJ/kg .

A continuación se expresan los poderes caloríficos de diversos gases combustibles en kJ/m^3 y su transformación a kJ/kg .

Gas	Peso molecular	kJ/m^3	Vol. de 1 kg (m^3)	kJ/kg
Hidrógeno	2	12 671	$22.4/2 = 11.2$	141 915
Metano	16	39 704	$22.4/16 = 1.4$	55 585
Etano	30	70 199	$22.4/30 = 0.75$	52 649
Propano	44	95 064	$22.4/42 = 0.51$	48 482
Butano	58	130 393	$22.4/58 = 0.39$	50 853

Debe observarse que el hidrógeno, que es el combustible de mayor poder calorífico en peso (kJ/kg), es el más pobre en relación con su volumen (kJ/m^3) a condiciones estándar.

El error que se introduce en los cálculos al considerar a los gases como perfectos es de un 1% para el etano, un 2% para el propano y un 4% para el butano normal.

En la práctica industrial los combustibles gaseosos suelen ser mezclas, y los poderes caloríficos están relacionados directamente con los correspondientes a cada componente y con su proporción en la mezcla.

Entre los combustibles, los gaseosos se caracterizan por ser más limpios, de intensidad y velocidad de combustión fácilmente regulables y se puede obtener una combustión completa con poco exceso de aire. Los combustibles gaseosos pueden ser naturales o fabricados. Naturales como el gas natural, el propano y el butano; y fabricados como el gas de gasógeno, la hulla, etc. Que son generados a partir de combustibles primarios. En la tabla 1.8 aparecen algunos de los combustibles gaseosos más utilizados.

Tabla 1.8 COMBUSTIBLES GASEOSOS

Composición química, porcentajes en volumen.	Principales combustibles gaseosos fabricados				
	Gas de Hulla	Gas de agua	Gas de alto Horno	Gas de gasógeno	Gas LP
Hidrógeno	54.5	40.5	1.0	14.0	-
Oxido de Carbono	10.9	34.0	27.0	27.5	-
Metano	24.2	10.2	-	3.0	-
Etano	-	-	-	-	-
Etileno	1.5	6.1	-	-	-
Benceno	1.3	2.8	-	-	-
Oxígeno	0.2	0.5		0.6	-
Nitrógeno	4.4	2.9	60.0	50.9	-
Bióxido de carbono	3.0	3.0	11.5	4.5	-
Butano	-	-	-	-	61.0
Propano	-	-	-	-	39.0

1.10.2 Otras Propiedades de los Combustibles Gaseosos

1.10.2.1 Densidad del gas referida al aire

Relación entre las masas de volúmenes iguales de gas y aire, supuestamente secos, a la temperatura de 0°C y a la presión de 760 mm de Hg.

1.10.2.2 Gasto calorífico

Producto del consumo volumétrico del gas por el poder calorífico del gas.

1.10.3 Inter cambiabilidad de los Gases Combustibles

Dos gases serán intercambiables cuando, para un quemador determinado, con las mismas condiciones de suministro, presión y temperatura, mantienen las mismas características de combustión.

Para determinar la inter cambiabilidad de los gases, se establecerán relaciones entre el gasto calorífico y el potencial de combustión.

Las relaciones anteriores se conocen por Índice de Wobbe (W) e Índice de Delbourg (C).

El índice de Wobbe (W) vendrá determinado por la expresión:

$$W = \frac{PC}{\sqrt{d}}$$

Siendo:

PC = Poder calorífico del gas

d = Densidad del gas referida al aire

El potencial de combustión (C) o índice de Delbourg se define por la fórmula:

$$C = U \frac{H_2 + 0.7CO + 0.3CH_4 - V \sum aC_nH_m}{\sqrt{d}}$$

Donde:

H_2 , CO, CH_4 , C_nH_m , composición centesimal de cada componente del combustible gaseoso. C_nH_m comprende a todos los hidrocarburos excepto al CH_4 .

U, V, son parámetros que dependen del tipo de hidrocarburo o del contenido de oxígeno e hidrógeno del gas.

Normalmente las compañías suministradoras de gas facilitan los siguientes datos: Poder calorífico superior, densidad relativa, índice de Wobbe e índice de Delbourg.

Como ejemplo se recogen los datos de suministro de varios gases.

• Gas natural de emisión	Poder calorífico superior	P.C.S. = 44 166 kJ/m ³
	Densidad relativa	d = 0.63
	índice de Wobbe	W = 13 286
	índice de Delbourg	C = 46
• Gas Natural Licuado 1	Poder calorífico superior	P.C.S. = 52 542 kJ/m ³
	Densidad relativa	d = 0.76
	índice de Wobbe	W = 14 329
	índice de Delbourg	C = 48
• Gas Natural Licuado 2	Poder calorífico superior	P.C.S. = 41 400 kJ/m ³
	Densidad relativa	d = 0.60
	índice de Wobbe	W = 12 791
	índice de Delbourg	C = 43

1.11 ALMACENAMIENTO, TRANSPORTE Y PREPARACION DE LOS COMBUSTIBLES

En la actualidad, las normas sobre almacenaje transporte y preparación de los combustibles, exigen un mejor control en dichos aspectos para evitar los accidentes; de ahí que cada combustible se debe de almacenar o transportar de acuerdo a sus características y propiedades.

1.11.1 Combustibles Sólidos

El carbón a granel puede recibirse en la instalación industrial ya sea por barco, ferrocarril o camión. El diseño adecuado de un sistema de almacenamiento y manipulación puede evitar muchos problemas.

El almacenamiento de antracita no presenta ningún riesgo. Sin embargo, el resto de los carbones presentan en su almacenamiento diversos riesgos como son; la disminución de su potencia calorífica por la acción del tiempo, su desmenuzamiento y el peligro de combustión espontánea.

En general se tendrán en cuenta para el almacenamiento a la intemperie las siguientes indicaciones:

- Nunca se debe almacenar en montones cónicos durante largo tiempo. se almacenará horizontalmente con los costados en pendiente.
- Deben eliminarse materiales de alta combustibilidad (papeles, madera, etc.).
- Las mezclas de carbones de distintos tamaños deben ser almacenados extendidos.
- No apilar el carbón alrededor de postes de estructuras de hormigón.

La temperatura del carbón almacenado será controlada para avisar del posible peligro de combustiones espontáneas que pudieran ocurrir.

- Debe evitarse la formación de huecos de aire y su circulación por dentro de la pila.

Cuando un carbón permanece almacenado durante largos períodos de tiempo se hace necesaria una compactación para evitar autoencendidos. Dicha compactación podrá implicar la necesidad de una trituración previa a la alimentación a tolvas de molienda, en el caso de quemarlo como pulverizado.

1.11.2 Combustibles Líquidos

Ciertos destilados del petróleo, como el gas-oil, pueden ser almacenados, manipulados y no requieren medidas especiales de calentamiento en los tanques de almacenamiento y sistemas de manipulación.

Para los combustibles residuales de la destilación del petróleo, como el fuel-oil, el calentamiento es necesario para un correcto almacenamiento, transporte manipulación y / o atomización del combustible.

1.11.3 Combustibles Gaseosos

Los gases combustibles distribuidos por canalización precisan, a su llegada a la fábrica, de una serie de instalaciones destinadas a poner el gas a disposición del usuario en las condiciones necesarias para ser utilizado con las debidas garantías de seguridad y buen funcionamiento.

Normalmente estas instalaciones se agrupan en un conjunto único denominado *Estación de Regulación y Medida* que tiene por objeto: filtrar el gas recibido, reducir y estabilizar su presión de llegada y medir el gas consumido.

La manipulación y mantenimiento de la estación está normalmente encargada al usuario, teniendo la compañía suministradora la facultad de acceso a ella para controlar los caudales, constantes del gas, estado de las medidas de seguridad, etc.

Por tanto, y desde el punto de vista del usuario, las medidas a adoptar serán muy limitadas, dado que las facultades de actuación en este aspecto corresponderán a las compañías suministradoras.

1.12 QUÍMICA DE LOS COMBUSTIBLES

Los combustibles líquidos y gaseosos se componen básicamente de carbono e hidrógeno y reciben el nombre de hidrocarburos. Estos combustibles generalmente se derivan del petróleo, el cual es el resultado final de la acción del tiempo, presión y temperatura sobre sustancias de origen orgánico

El petróleo consta de una mezcla de hidrocarburos que varía del 50 al 98% de ciertos compuestos; los cuales forman seis familias las cuales son:

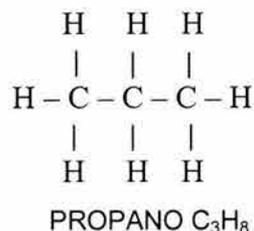
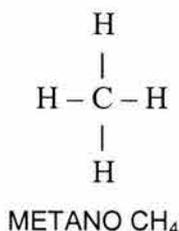
FAMILIA	FORMULA	ESTRUCTURA
Parafinas	$C_n H_{2n+2}$	Cadena saturada
Olefinas	$C_n H_{2n}$	Cadena no saturada
Diolefinas	$C_n H_{2n-2}$	Cadena no saturada
Naftenos	$C_n H_{2n}$	Anillo saturado
Aromáticos	$C_n H_{2n-6}$	Anillo no saturado

El resto consta de materias orgánicas que contienen oxígeno, nitrógeno y azufre, así como compuestos metálicos. De esta mezcla se obtiene una densidad específica que varía de 0.8 a 0.95.

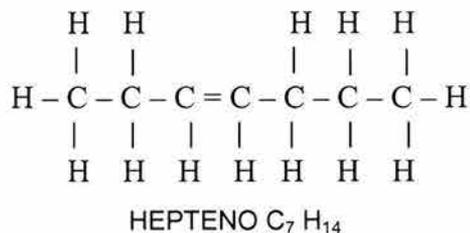
Se dice que un hidrocarburo está saturado cuando todos sus átomos de carbono están unidos por una simple ligadura. Un hidrocarburo se considera no saturado cuando los átomos de carbono están unidos por una doble o triple ligadura. Debido a que la energía liberada por el combustible se obtiene básicamente por la ruptura de dichas ligaduras, se puede apreciar que al contar con un mayor número de éstas se tendrá un incremento en la energía liberada.

Los hidrocarburos se caracterizan, por tener un enlace covalente el cual consiste en compartir los electrones del último nivel energético a fin de alcanzar una estructura electrónica estable.

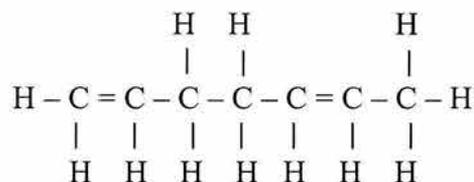
La serie de hidrocarburos parafínicos comienza con el metano (CH_4); el siguiente hidrocarburo de la serie tiene un átomo más de carbono y dos más de hidrógeno unidos a él.



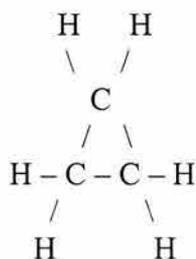
Las olefinas tienen cadena abierta como las parafinas; pero existe algún enlace doble que puede estar entre dos átomos de carbono cualesquiera:



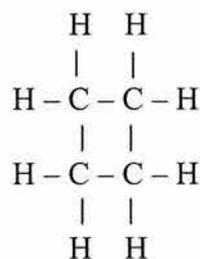
Las diolefinas tienen una estructura análoga a las olefinas; pero existen dos, dobles enlaces. En consecuencia, estas, moléculas se encuentran menos saturadas que las olefinas. Los números que preceden el nombre de la molécula indican la localización de los enlaces doble

1, 5 HEPTADIENO C₇H₁₂

La serie nafténica de los hidrocarburos tiene sus átomos de carbono unidos por enlaces simples, cada uno de ellos, unido a los dos adyacentes, formando así una estructura de anillo:

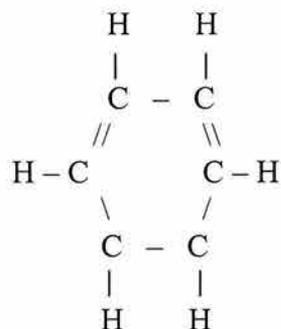


CICLOPROPANO



CICLOBUTANO

La serie aromática de hidrocarburos forma una estructura de anillo con tres dobles ligaduras, llamada anillo bencénico:



BENCENO

CAPÍTULO 2

COMBUSTIÓN

2.1 EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

La importancia del estudio de la combustión se basa en que la energía empleada en la gran mayoría de las aplicaciones industriales, domésticas transporte, etc; proviene precisamente de la combustión de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos los cuales deben ser utilizados de una forma racional y eficiente.

La combustión es una reacción química de oxidación exotérmica entre los componentes de un combustible y un comburente (oxígeno del aire). La reacción es rápida y se libera calor, luz y energía en forma de una flama. La combustión no siempre es visible con efectos tales como flamas y radiaciones. Las flamas constituyen el medio de transportación o propagación de la reacción a través del espacio y conforman la zona de gases incandescentes visible alrededor de los reactivos que se hallan en combustión. Esta propagación es una de las principales diferencias de la combustión con respecto a otras reacciones químicas.

La velocidad de la reacción, depende de una forma muy importante de la temperatura, y el carácter exotérmico de la misma, hacen que una vez iniciada en un punto, se continúe desarrollando. A temperatura ambiente, sin embargo, el ritmo de la reacción es despreciable..

Los objetivos que puede tener generar una reacción de combustión pueden ser varios:

- Producción de energía. Dicha energía, a su vez puede manifestarse en varias formas:
 - Calor (para calefacción, por ejemplo)
 - Trabajo (desde mover una máquina o llevar acabo cualquier tipo de trabajo destructivo).
- Síntesis de compuestos
- Producción de luz
- Producción de ruido

La reacción de combustión se ve notablemente afectada por las condiciones en que tiene lugar, y por una serie de fenómenos físicos. Hasta tal punto es importante dichas condicionantes que, aunque según la definición anterior, la combustión sería un fenómeno puramente químico, en la práctica se considera que tiene al menos tanto de fenómeno físico como de fenómeno químico.

En el apartado siguiente se distinguen los fenómenos que en mayor o menor medida según los casos, intervienen en el proceso, y las disciplinas que los estudian.

2.2 FENÓMENOS INVOLUCRADOS

Los fenómenos involucrados en los procesos combustión se pueden clasificar como siguen:

- Fenómenos químicos. Su tratamiento se puede abordar por medio de:
 - Estequiometría (balance másico).
 - Balance de calores de reacción. Esta sería la forma más simple de plantear el problema; pero para conocer la composición final de los productos quemados y la cinética de la reacción es necesario plantear además:
 - Equilibrio químico.
 - Tiempo de retraso.
 - Velocidad de reacción. Siendo la Termodinámica química o Termoquímica la ciencia que se ocupa de estas materias.
- Fenómenos de transporte. Se tienen en cuenta por medio de las ecuaciones de conservación, también llamadas de transporte, y se refieren a:



Se ha situado a la derecha la ciencia en la que se estudia cada uno de los fenómenos de transporte. En algunas de estas ecuaciones se conjugan varias disciplinas, incluyen el efecto de las reacciones químicas, como por ejemplo, en los términos que dan origen a las ecuaciones de conservación de la materia y de conservación de la energía.

Todos estos fenómenos caracterizan el proceso de combustión. Cada uno de ellos tiene asociado un tiempo característico. En cualquier proceso de combustión uno de estos fenómenos es el que controla la combustión, y corresponde al de mayor tiempo característico. En general, son los fenómenos de transporte los que controlan, por lo que se suele decir que la combustión es más un problema físico que químico.

En la transferencia de propiedades encontramos que para procesos de combustión de premezcla laminar, la transferencia de calor suele ser el proceso que controla. Lo mismo ocurre en mezclas turbulentas, pero en este caso la transferencia de calor se ve acelerada por la turbulencia. En procesos de combustión por difusión, el fenómeno que controla es el de transferencia de masa.

En la mayoría de las aplicaciones resulta interesante conocer ambos aspectos del proceso de combustión el análisis de los fenómenos de transporte permitirá determinar la evolución de la velocidad de combustión, mientras que el análisis químico tiene interés para el cálculo de los tiempos de retraso y de emisiones contaminantes.

2.3 ASPECTOS GENERALES DE LA COMBUSTIÓN

Todos nosotros somos dependientes de la combustión de combustibles fósiles, para generar electricidad, calentar el agua doméstica, o dentro de un motor de combustión interna. Como estos son un recurso finito, deben ser usados de una manera eficiente y con la mínima contaminación posible, esto es de vital importancia ya que en los últimos años se ha incrementado el nivel de contaminantes en la atmósfera.

La oxidación rápida conocida como combustión, es un proceso de transformación de energía química latente a energía molecular (manifestada en forma de calor), por tanto, de una elevación considerable de la temperatura de los productos. Se llaman productos a las sustancias resultantes de la combustión y reactivos a los constituyentes de la mezcla reaccionante.

La sustancia oxidante o comburente más empleada es el oxígeno del aire, aunque existen otras sustancias capaces de reaccionar con un combustible. La velocidad del frente de flama es función particular de las características del combustible y de las condiciones en que se produce la combustión, como la relación aire / combustible o la presión de la mezcla.

A la combustión por flama se le puede llamar también combustión continua o combustión subsónica, por ser la velocidad de propagación de la reacción inferior a la velocidad del sonido en el aire. En tanto que la explosión es una combustión con velocidad de propagación supersónica con velocidades entre 1 y 8 km/s.

Tratándose la combustión como una reacción termoquímica de oxidación rápida no sólo el oxígeno es capaz de tomar parte como comburente. El hidrógeno, el fósforo y el arsénico arden desprendiendo luz y calor en presencia del cloro que actúa al igual que el oxígeno como fuente oxidante.

El estudio de la combustión y sus elementos asociados, combustibles y equipos, constituye un factor importante en la utilización racional de la energía, de aquí la importancia del estudio del proceso de combustión. Como en la mayor parte de las aplicaciones técnicas lo que se exige en estos procesos es la obtención del máximo calor posible; es decir, uno de los principales objetivos será, como todo proceso termodinámico, el de obtener la máxima eficiencia térmica, la cantidad de calor liberado se expresa normalmente en BTU (British Thermal Units), calorías o kilojoules.

2.3.1 Composición del Aire

El aire, que es el comburente más habitual de un proceso de combustión, se compone de los siguientes elementos:

- ✓ Oxígeno, O₂
- ✓ Nitrógeno, N₂
- ✓ Gases inertes, principalmente CO₂ y Argón
- ✓ Agua

La composición exacta del aire varía en función de diversas circunstancias, como pueden ser, la humedad (que cambia según la localización geográfica y la situación meteorológica), y en menor medida la proximidad a núcleos urbanos o industriales, o a zonas con vegetación.

La composición de cualquier compuesto, se puede expresar en términos de masa, número de moles y volumen. En el primer caso se emplea la fracción másica de los componentes: Y_i y en los otros dos casos se emplea la fracción molar, que para gases es equivalente a la fracción volumétrica: X_i.

$$\begin{array}{ll} \text{húmedo} & X_i = \frac{n_i}{\sum n_i} & Y_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \\ \text{seco} & (X_i)_s = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad (i \neq H_2O) & (Y_i)_s = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (i \neq H_2O) \end{array}$$

La composición media del aire seco, es decir, sin H₂O es la siguiente, en términos de fracción molar:

- X(N₂)_s = 0.78084
- X(O₂)_s = 0.20946
- X(Ar)_s = 0.00937
- X(CO₂)_s = 0.00033
- X(H₂O)_s = 0

Para obtener la composición del aire húmedo, es necesario conocer la humedad absoluta del aire. Si la medida tomada en un psicrómetro viene como humedad relativa, es posible transformarla en humedad absoluta por medio de una carta psicrométrica y conociendo también la temperatura de bulbo seco. En ese caso la composición del aire húmedo queda:

- X(N₂) = 0.78084 (1-X (H₂O))
- X(O₂) = 0.20946 (1-X (H₂O))
- X(Ar) = 0.00937 (1-X (H₂O))
- X(CO₂) = 0.00033 (1-X (H₂O))
- X(H₂O) = f (humedad)

A partir de estas fracciones molares y del peso molecular de cada componente puede hallarse el del aire:

- Pm(O₂) = 32.00 g/mol
- Pm(N₂) = 28.02 g/mol
- Pm(Ar) = 39.95 g/mol
- Pm(CO₂) = 44.01 g/mol
- Pm(H₂O) = 18.00 g/mol
- Pm(aire) = X(O₂)Pm(O₂) + X(N₂)Pm(N₂) + X(Ar)Pm(Ar) + X(CO₂)Pm(CO₂) + X(H₂O)Pm(H₂O)
- = 28.9704 – 10.9704 X (H₂O)

Se da por bueno el valor de 29 para el aire seco. La composición del aire en términos de masa puede calcularse haciendo:

$$Y_i = \frac{X_i Pm_i}{Pm_{(aire)}}$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE FRACCIÓN MASA

AIRE SECO	AIRE HÚMEDO
Y(N ₂) _s = 0.75522	Y(N ₂) = 0.75522(1-Y(H ₂ O))
Y(O ₂) _s = 0.23136	Y(O ₂) = 0.23136(1-Y(H ₂ O))
Y(Ar) _s = 0.01292	Y(Ar) = 0.01292(1-Y(H ₂ O))
Y(CO ₂) _s = 0.00050	Y(CO ₂) = 0.00050(1-Y(H ₂ O))
Y(H ₂ O) _s = 0	Y(H ₂ O) = f (humedad)

Expresiones que, aunque menos habituales que las fracciones molares, tienen la ventaja de que en la carta psicrométrica se obtiene directamente Y (H₂O).

En algunas ocasiones, para simplificar, se suele asignar el agua y los gases inertes al nitrógeno. En este caso la composición del aire y la proporción de sus componentes se muestran a continuación, para el caso de aire seco y aire húmedo, habiéndose tomado en este último una humedad relativa media del 50 % a 25 °C, lo que supone una humedad absoluta Y(H₂O) = 0.0164 tomado en este último una humedad relativa media del 50% a (que a su vez proporciona, iterando:

X(H₂O) = 0.026134:

Aire seco O₂ + N₂ + Ar + CO₂

Y(N₂)_s = 0.7522 $\frac{Y(N_2)_s}{Y(O_2)_s} = 3.26$

Y(O₂)_s = 0.2314

X(N₂)_s = 0.78084 $\frac{X(N_2)_s}{X(O_2)_s} = 3.72$

X(O₂)_s = 0.2095

Aire húmedo O₂ + N₂ + Ar + CO₂ + H₂O

Y(N₂) = 0.7724 $\frac{Y(N_2)}{Y(O_2)} = 3.39$

Y(O₂) = 0.2276

$$X(N_2) = 0.7960 \quad \frac{X(N_2)}{X(O_2)} = 3.90$$

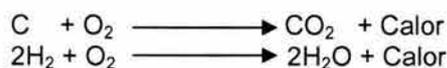
$$X(O_2) = 0.2040$$

2.3.2 Relaciones de Aire / Combustible

En general, 0.02832 metros cúbicos de aire liberarán 105.5 kJ de calor independientemente del tipo de combustible usado. Esto varía ligeramente con algunos combustibles, pero la variación es muy pequeña, para usos prácticos esta relación se mantendrá constante para todos los combustibles. Los combustibles que son quemados con aire suficiente para desprender la energía total que este produce, se dice que son quemados en "relación", o que la combustión es completa, debido a la inexistencia de oxígeno libre o cualquier remanente de combustible sin quemar.

En la combustión de Gas Natural (que normalmente se estima en 37 252 kJ/m³), escuchamos frecuentemente la expresión "Relación 10 a 1". Esto significa que hay 10 partes en volumen de aire presente por cada parte en volumen de gas natural, que se está quemando para desprender el calor máximo del combustible, y da por resultado una combustión completa; es decir, no hay partículas de oxígeno libres y combustible sin quemar.

En la actualidad, una pequeña cantidad de gases contienen exactamente 37 252 kJ/m³ y también su relación varía ligeramente, pero en general, la mayor parte de los gases se aproximan a los 37 252 kJ/m³ como a su relación, por lo que éstas se usan de manera muy frecuente. A continuación se dan algunos ejemplos de los componentes usuales de los combustibles como el hidrógeno y carbono o combinaciones de éstos. Una relación típica podría ser como sigue:



donde:

C	= Carbono	H	= Hidrógeno
O	= Oxígeno	CO	= Monóxido de Carbono
CO ₂	= Bióxido de Carbono	H ₂ O	= Agua

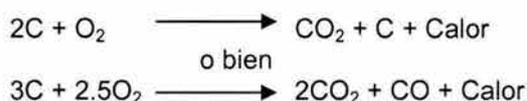
Otras ecuaciones muestran la combustión del carbono y el hidrógeno que pueden ser variaciones de las dos fórmulas mostradas arriba, dependiendo de la cantidad de carbono e hidrógeno presente en algunos combustibles en particular.

Cuando hay un exceso de oxígeno disponible para el proceso de combustión, podemos mostrar lo siguiente:



$X > Y$ La diferencia se utiliza para formar CO₂ ó H₂O según sea la reacción.

Cuando hay una deficiencia de oxígeno necesario para completar la combustión, las siguientes ecuaciones representan la relación:



En el primer caso, la fórmula podría representar la combustión de "Petróleo" donde no hay oxígeno suficiente, y el resultado es el hollín que es común observar. En el segundo caso, la

reacción representa la formación del monóxido de carbono (que puede quemarse si los gases están suficientemente calientes y si hay suficiente oxígeno para luego introducirlo en el proceso).

Una buena combustión es el resultado de una mezcla adecuada del combustible con el aire, tanto que, en cada partícula de combustible se tenga la cantidad exacta de oxígeno para completarla y desprender la energía calorífica correspondiente. También son necesarias, para una buena combustión, las fuentes de ignición (como las bujías o un block de combustión caliente); y un contenedor de flama (como una boquilla o el mismo block de combustión). Sin estos, el combustible al introducirse al sistema con el suficiente oxígeno teórico para completar la combustión, tendrá aun partículas de carbón flotando alrededor de la atmósfera, dando como resultado que el combustible no se mezcla con el oxígeno debido a que el tiempo no es suficiente para completar la combustión.

La estequiometría, es la relación de 0 % de exceso de aire. Esto es, todo el combustible tiene suficiente oxígeno de modo que todo se combine y no salga combustible sin quemarse por la chimenea o la salida de gases. De forma similar, todo el oxígeno que fue expuesto con la cantidad de combustible se utilizará y no habrá ningún residuo.

La temperatura de flama teórica es una medida calculada de la temperatura de los gases resultantes, cuando la cantidad exacta de combustible y aire se mezclan para la combustión.

En aplicaciones reales, esta temperatura nunca se alcanza, porque la medida del combustible y la distribución del aire no es exacta y también, porque la dilución del aire alrededor del quemador y otros materiales absorben el calor de la flama cuando esta se genera.

Cuando la cantidad de energía disponible en una porción de combustible se determina, se debe calcular el volumen de aire necesario para suministrar la cantidad adecuada de oxígeno. Esta cantidad de aire necesario, para llevar a cabo la combustión, se denomina relación estequiométrica o aire teórico, y se define como la cantidad de aire necesario que requiere el combustible para reaccionar sin que haya oxígeno saliendo después del proceso de combustión; es decir, tenemos en la salida de los gases de la combustión 0% de oxígeno ó 0% de exceso de aire. De forma similar no hay partículas adicionales de combustible en esta área, esto también se refiere a un 0% de combustible. También, algunos procesos requieren un exceso de oxígeno para completar las reacciones químicas, como el traslado de materiales orgánicos de un producto antes de exponerlo a altas temperaturas. Bajo estas condiciones se adiciona un exceso de aire usualmente a través del quemador y su propósito principal es suministrar oxígeno para la reacción y disminuir la temperatura de flama de los gases que salen del quemador. La cantidad de este exceso de aire podría calcularse usando la información descrita arriba. Antes debe conocerse la cantidad de aire teórico que se necesita para la combustión, cualquier volumen adicional de aire agregado deberá dividirse por la cantidad teórica y el resultado, expresado en por ciento, representa la cantidad de aire en exceso en un sistema. Si esta cantidad se suma al 100% el resultado sería el porcentaje total del aire en el sistema.

En el otro extremo es una condición de exceso de combustible, o combustibles, presente en la chimenea de gases. Cuando esto sucede, habrá una deficiencia de oxígeno (menos que el 100% de aire total) en la cámara de combustión. Si la cantidad de aire presente no es suficiente para todas las partículas de combustible que requieren oxígeno, algo del combustible permanecerá sin quemarse. Los resultados de tal fenómeno son una baja temperatura de flama, costos elevados de combustible que no se aprovecha en el proceso de combustión, y en algunos casos, reacciones químicas adversas en el producto.

En otros casos, donde hay suficientes cantidades de oxígeno en el proceso para combinar con todo el combustible, pero las temperaturas son tales que el proceso de combustión se interrumpe (se apaga) antes de que todo el combustible se combine con el oxígeno necesario. Esto sucede a menudo en las zonas de precalentamiento de los hornos, o en hornos operando a bajas temperaturas donde las cantidades masivas de aire secundario están entrando al sistema. Cuando

esto ocurre, la temperatura del proceso de combustión disminuye y la flama se apaga. Bajo estas condiciones, es posible tener una condición de exceso de aire y combustible sin quemarse simultáneamente, Mientras estas expresiones son algo engañosas, esto indica que el combustible y el oxígeno estaban en cantidades suficientes para realizar la combustión, pero el proceso de combustión es detenido por un descenso en la temperatura de la mezcla o la carencia de una fuente de ignición para completar la reacción química. Bajo esta situación, una explosión podría ocurrir si esos gases son expuestos a una fuente de ignición, ya que ellos viajan de la cámara de combustión al área de escape. Si el área es tal que los gases no son encerrados, la ignición y la flama pueden aparecer, dando como resultado una explosión lo que provocaría daños al proceso. Por esta razón, es muy importante monitorear el proceso de combustión de tal manera que obtengamos el máximo desprendimiento de energía del combustible y prevenir las condiciones que podrían dar lugar a explosiones.

El gas más común que se forma como una reacción del combustible es el Bióxido de carbono (CO_2). Usando un ejemplo de gas natural y aire normal, podemos esperar que se forme 12.25 % de CO_2 si todas las condiciones son conocidas. En la práctica real, sólo el 10.5 % al 11 % de CO_2 puede formarse durante la combustión, ya que el movimiento de los gases es tal que, bajo condiciones ideales puede ser constante, y todo el combustible no podrá hallar pronto el oxígeno suficiente presente para completar la reacción. Por esta razón hay combustible en el proceso, esto puede también ser medido con instrumentos adecuados.

Existe un 21 % de oxígeno en el aire normal, éste puede ser una medida de la eficiencia de combustión. Idealmente, un análisis de flujo de gases de combustión de 0% de combustibles podría llevarse a cabo. Sin embargo, puesto que el tiempo de reacción del combustible con el oxígeno excede el tiempo en que están los gases en la cámara de combustión, es más práctico esperar aproximadamente 0.5 % de oxígeno. Una lectura menor del 0.5 % podría mostrar que están presentes condiciones ideales.

Hay varios tipos de instrumentos disponibles para medir cada uno de estos gases para controlar la combustión. Es preferible la medición de oxígeno antes que CO_2 , el análisis de CO_2 podría cambiar con varios tipos de combustible específicamente gas natural, aceite combustible, carbón, etc. Por otra parte, el oxígeno permanece constante, y cualquier cantidad en exceso de oxígeno sobre el nivel de 0.5 % indica un proceso en el cual no se está obteniendo completamente la energía del combustible; es decir, se tiene un exceso de aire mayor al requerido para quemar el combustible, el cual nos ocasiona pérdidas por enfriamiento de los gases de la combustión.

2.3.3 Tipos de Procesos de Combustión

2.3.3.1 Clasificación de los procesos de combustión

Los procesos de combustión se pueden clasificar como sigue:

1. **Combustión generalizada, o autoencendido.** Se caracteriza por una discontinuidad temporal, pero no espacial: cualquier volumen diferencial está en las mismas condiciones, en un instante determinado. El inicio de la combustión no está ocasionado por un agente exterior (no hay ignición, por lo que se denomina autoencendido), y la fase final es muy rápida y exotérmica (por lo que también se suele llamar explosión). Su estudio tiene interés, por ejemplo: para la prevención de explosiones.

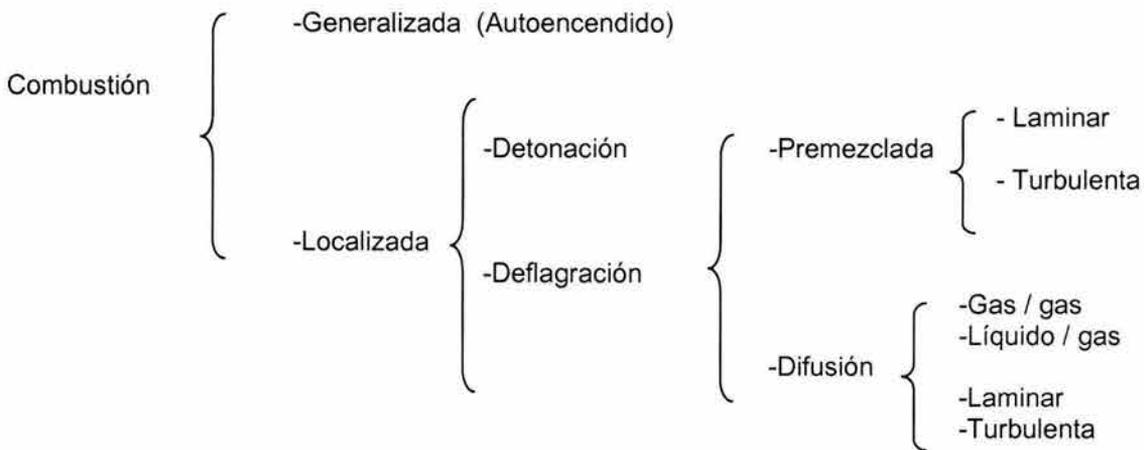
2. **Combustión localizada.** Se caracteriza por una discontinuidad espacial, pero no temporal. Para su generación se requiere una fuente externa (ignición), y existe un frente de flama que progresa. Según el tipo de discontinuidad espacial, la combustión localizada se puede clasificar en:

- a. **Combustión localizada con discontinuidad de presión.** Son los procesos de combustión muy rápidos, en los que la velocidad de combustión es del orden de la velocidad del sonido. Por esta razón no se puede considerar homogeneidad de presiones, siendo necesario tener en

cuenta la onda de choque generada. Se denomina detonación, se presenta en el caso de combustión en motores de encendido provocado.

b. Combustión localizada con discontinuidad de temperatura. La velocidad de combustión de estos procesos es mucho menor que la del sonido, por lo que se considera que las variaciones de presión se transmiten instantáneamente. La discontinuidad de temperatura se localiza en el frente (o frentes) de flama, siendo la energía liberada en la combustión la que mantiene dicho frente de flama. Este tipo de procesos de combustión recibe el nombre de deflagración. Este último tipo de combustión puede, a su vez, clasificarse según las fases iniciales de los reactantes, en gas / gas y líquido / gas, y tanto la premezclada como la combustión por difusión, pueden ser laminar o turbulenta.

A continuación se esquematiza esta clasificación:



Esquema 2.1 Clasificación de la combustión

En la tabla 2.1 se muestra una comparación entre las variables características de un proceso de detonación y las de un proceso de deflagración. Cabe resaltar la gran diferencia existente entre las presiones de la zona quemada y sin quemar en el caso de la detonación, frente a la deflagración, lo que justifica el hecho de subrayar la discontinuidad de presiones.

Tabla 2.1 Comparación de los procesos de detonación y deflagración

Diferencias cuantitativas entre detonación y deflagración (valores usuales)		
Relación	Detonación	Deflagración
u_{sq}/a	5 - 10	0.0001 - 0.03
u_q/u_{sq}	0.4 - 0.7	4 - 16
p_q/p_{sq}	13 - 55	0.98 - 0.976
T_q/t_{sq}	8 - 21	4 - 16
ρ_q/ρ_{sq}	1.4 - 2.6	0.06 - 0.25

Nota: a es la velocidad del sonido en los gases sin quemar
 u_{sq} es el número de Mach
 P es presión
 ρ es densidad

Obsérvese también que la discontinuidad de temperaturas es mayor en la detonación que en la deflagración, a pesar de lo cual, se considera característica de la deflagración por no tener ésta discontinuidad de presiones. También puede observarse que las velocidades de los productos

quemados son mayores que las de los gases sin quemar en la deflagración mientras que en la detonación ocurre lo contrario, si bien ambas velocidades son mayores en la detonación que en la deflagración.

2.3.3.2 Simplificaciones habituales de las ecuaciones generales

La adimensionalización de las ecuaciones de conservación pone de manifiesto que la simplificación de estas ecuaciones depende del tipo de proceso de combustión, de la geometría y del tamaño del volumen de control, de las condiciones termodinámicas con que se inicia, de la periodicidad de los fenómenos físicos asociados, etc. No obstante, es posible realizar algunas afirmaciones, como las siguientes:

En el caso de la detonación, la derivada temporal de la presión, término perteneciente a la ecuación de la energía, no es despreciable, a diferencia del resto de procesos, dado que en este caso las velocidades de combustión alcanzan órdenes de magnitud similares a la velocidad de propagación de las ondas de presión.

En cuanto a la consideración de fluido incompresible, que conduce a dejar a la densidad fuera de las derivadas de las ecuaciones de conservación de masa y de momento, esta simplificación solo es aceptable en algunos casos de procesos de deflagración y nunca en los de detonación.

Los términos en derivadas temporales, siempre difíciles de abordar, a menudo se desprecian por medio de la consideración de proceso en estado permanente, aunque tal hipótesis es con frecuencia fuente de errores. En el caso del autoencendido, dichos términos nunca se pueden despreciar, ya que frente a ellos los términos convectivos y difusivos tienen muy poco peso.

En cuanto a los términos convectivos y difusivos de las ecuaciones conservativas, los primeros no se pueden despreciar en ninguno de los procesos de combustión premezclada o por difusión, y los segundos sólo en las fases líquidas (debido a los pequeños valores del número de Mach) de los procesos de difusión líquido / gas.

Para que se comprenda un poco mejor lo expuesto anteriormente en el anexo II se expone brevemente las ecuaciones de conservación

2.4 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA COMBUSTIÓN

En el proceso de combustión, el grado de oxidación que se alcanza en la reacción determina que ésta sea completa o incompleta, entendiéndose por combustión completa aquella en la que el combustible se oxida totalmente (cede toda su energía) e incompleta cuando parte de esta energía se pierde debido a la reacción deficiente del carbono que contiene el combustible, formando monóxido de carbono. Dicha deficiencia puede producirse por:

- a. Insuficiencia de oxígeno
- b. Mezcla imperfecta del oxígeno y el combustible
- c. Temperatura demasiado baja para mantener la combustión
- d. Tiempo insuficiente para llevar a cabo la combustión

Las condiciones necesarias para la combustión; son específicamente combustible, oxígeno (en el aire), y una fuente de ignición. Si alguno de éstos falta la combustión no ocurrirá. La fuente de ignición puede ser una mecha, la chispa de una bujía, una pared caliente de refractario, o alguna otra fuente concentrada de calor que esta por arriba de la temperatura de ignición de la mezcla. Una vez que la mezcla ha sido encendida, continuará así y ésta generará su propia fuente de ignición hasta que se queme el combustible. Bajo condiciones ideales, cuando exista la cantidad adecuada de combustible y aire, la combustión continuará; hay casos en los que existe demasiada

cantidad de aire o combustible y el proceso de combustión no ocurrirá, mientras no exista una fuente de ignición.

Considerando qué pasa cuando hay una mezcla de una parte de combustible y 10 partes de aire con una fuente de ignición, tenemos:

1. Las partículas de combustible llegan a la fuente de ignición absorbiendo el calor, y (por esta razón la temperatura para encendido debe ser alta y debe existir suficiente oxígeno) encenderá.
2. El calor de estas partículas de combustible encendidas proveen de una fuente de ignición para la siguiente partícula de combustible y el proceso de combustión, lo cual da como resultado que el proceso de combustión se propaguen por sí mismo como una reacción en cadena.

En el caso donde hay un proceso con gran cantidad de partículas de aire, el proceso de combustión se lleva a cabo como antes se menciona, pero por haber un exceso de aire, parte del calor del proceso de combustión es absorbido por este exceso de aire, la temperatura final y la propagación de flama se reduce. Dentro de ciertos límites, podría estar presente un exceso de aire y la combustión aún así puede ocurrir. Sin embargo, si estos límites se exceden, el exceso de aire absorbería el calor generado por el proceso de combustión de las partículas de combustible. La siguiente partícula de combustible no tendría el suficiente calor para aumentarla arriba de su temperatura de ignición y la flama se extinguiría. Bajo estas condiciones una fuente de ignición permanente es necesaria para continuar la combustión; esta es una flama inestable y en un horno frío, puede ser muy peligroso.

Bajo condiciones donde hay un exceso de combustible (o una deficiencia de oxígeno), la combustión puede continuar como se describe anteriormente por exceso de aire. Sin embargo, las partículas de combustible que absorben el calor de otras previamente dan como resultado una cantidad más pequeña de calor desprendida que si el proceso continuara con oxígeno suficiente. En el caso donde la mezcla sobrepasa la correcta para la combustión, las partículas de combustible absorben todo el calor de la fuente de ignición y no libera calor para continuar la combustión; por consiguiente, el proceso se detiene: en estos casos una flama continua no se puede usar. Esto es similar al caso de niveles muy altos de exceso de aire donde la flama no puede establecerse, esta condición puede ser más peligrosa que la de exceso de aire, cuando esta mezcla encuentra un área donde hay oxígeno, ella puede encontrarse dentro de los límites de flamabilidad del combustible y es seguro que una explosión ocurra, si está presente una fuente de ignición.

Generalmente, el gas natural está referido en un límite de combustión de 4.5 partes de aire por una parte de combustible en el lado rico y de 13.5 partes de aire por una parte de combustible en el lado pobre. Cualquier mezcla fuera de estos límites no encenderá a pesar de la fuente de ignición; si hay un horno muy caliente y el combustible con una gran cantidad de exceso de aire se combinará con el oxígeno para llevar a cabo la combustión, pero la eficiencia será muy pobre y tenderá a enfriar el horno al punto que la combustión se interrumpa.

2.5 CINÉTICA QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN

2.5.1 Introducción

Haciendo referencia a los dos campos de la ciencia entre los cuales se puede situar la combustión, el aspecto químico resuelve la composición de una mezcla en la que tiene lugar la combustión, por medio de la cinética química de las reacciones características del proceso.

La cinética química es el estudio cuantitativo de las reacciones químicas. Aborda la determinación experimental o teórica de las velocidades de formación o desaparición de las especies químicas durante las reacciones, y el efecto de temperatura, presión, composición, etc, sobre dichas velocidades.

2.5.2 Sistemas CHON

2.5.2.1 Compuestos que intervienen

Se denomina sistemas CHON a las reacciones de combustión en las que intervienen los elementos: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O) y Nitrógeno (N). Los principales compuestos que aparecen como productos de estas reacciones son:

CO₂ H₂O O₂ N₂ CO H₂ H N NO OH NO C
CH₄

Para realizar el análisis de la reacción se pueden considerar tantos de estos productos, o de otros no citados por ser menos usuales y por darse en concentraciones normalmente despreciables, cuando se citan es porque se pretenda hacer más complejo el análisis.

Los modelos más simples son aquellos que no consideran la existencia de disociación entre los productos finales, y suelen considerar los cuatro primeros compuestos citados (CO₂, H₂O, O₂, N₂). También podemos encontrar sistemas más complejos que consideran la disociación, entonces se consideran también los dos siguientes, CO y H₂ (incluyendo CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, H₂), productos que no llegan a quemarse completamente por no encontrar oxígeno a su alrededor.

Otros modelos convencionales tienen en cuenta la disociación entre los productos finales, y consideran los once primeros compuestos citados (CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, H₂, H, N, O, OH, NO). Por último, algunos modelos más complejos se consideran, mediante un tratamiento especial, los trece compuestos citados. Los dos últimos, C y CH₄ tienen especial interés para la predicción de la formación de humos e hidrocarburos sin quemar (HC). Sin embargo, no suelen incluirse en el sistema de ecuaciones generales, sino que se tienen en cuenta por medio de sub-modelos cuyos resultados se añaden a los del modelo convencional. Esto es debido a la gran heterogeneidad existente en los procesos de combustión habituales.

Por ejemplo, en el caso de motores de encendido por chispa, aparte de las zonas de productos quemados y de productos sin quemar, separadas por un frente de flama, existen zonas de apagado de flama, algunas de ellas por su proximidad con la pared (wall quenching), que es donde principalmente se generan los HC (combustibles no quemados), siendo éstos inestables en la zona homogénea de productos quemados debido a las altas temperaturas. En el caso de los motores de encendido por compresión la generación de carbón atómico, y por tanto de humos, tiene lugar en la zona interior del chorro de combustible inyectado, donde muy poco aire ha podido entrar, mientras que es en una zona externa, donde tiene lugar la combustión.

Para resolver los sistemas CHON por medio de modelos convencionales, se pueden aceptar las siguientes hipótesis simplificadoras, en función del valor de la temperatura alcanzada por los productos de la combustión:

Para $T < 1250$ K Se consideran productos finales sin disociación

Para $T > 2000$ K Aparecen, además, CO, H₂ y OH

Para $T > 2400$ K Aparecen, además, H y O

Para $T > 3000$ K Aparece también NO

Para $T > 3500$ K Aparece también N

Como se aprecia, a partir de una temperatura de 2400 K es necesario tener en cuenta la disociación, dejando de ser válidos los modelos simples.

Los productos que aparecen cuando hay disociación suponen un porcentaje en masa del orden del 1%, por lo que no afectan sustancialmente a la hora de realizar un balance de masas, sin embargo, cuando lo que interesa es conocer la concentración de las especies contaminantes, entonces estos productos sí son importantes, no solo a partir de los 2 000 K, sino incluso desde

bajas temperaturas. Por esta razón tiene importancia la medición o la predicción de estas especies.

2.5.2.2 Análisis de sistemas CHON

Se va a plantear el análisis de sistemas CHON por medio de un modelo convencional, es decir, considerando todos los productos anteriores excepto C y CH₄. Los reactantes que intervienen en la reacción de combustión, de una forma genérica, son:

$$m_c \text{ (kg de } C_n H_m O_p \text{)} + m_a \text{ (kg de aire)}$$

Se definen las fracciones másicas de cada elemento en el combustible, donde c es el peso molecular del combustible:

$$Y\left(\frac{C}{c}\right) = \frac{12n}{12n + m + 16p}$$

$$Y\left(\frac{H}{c}\right) = \frac{m}{12n + m + 16p}$$

$$Y\left(\frac{O}{c}\right) = \frac{16p}{12n + m + 16p}$$

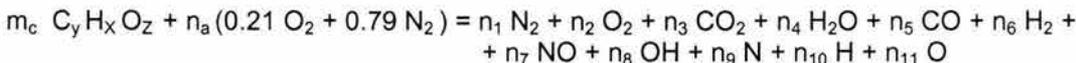
Resulta más cómodo utilizar estas fracciones másicas divididas por el peso molecular de cada elemento:

$$y = \frac{Y\left(\frac{C}{c}\right)}{PM_c} \quad x = \frac{Y\left(\frac{H}{c}\right)}{PM_H} \quad z = \frac{Y\left(\frac{O}{c}\right)}{PM_o}$$

que tendrán por unidades $\frac{kmol}{kg}$, de manera que si refieren todas las expresiones a la masa de combustible, m_c al multiplicar por ésta, quedará el resultado en kmoles = (n° de moles/1000) Por otra parte, la cantidad de moles de aire será:

$$n_a = \frac{m_a}{29}$$

Introduciendo estas conversiones, el planteamiento queda de tal forma que m_c kg de combustible reacciona con n_a moles de aire, con la ventaja de que en la expresión aparece la masa de combustible que reacciona:



Dada esta reacción en las que aparecen 11 incógnitas, será necesario encontrar para la resolución otras once ecuaciones. El balance de masas para cada elemento proporciona cuatro elementos:

Nitrógeno:	2 n _a 0.79	= 2 n ₁ + n ₇ + n ₉
Oxígeno:	z m _c + 2 (0.21) n _a	= 2 n ₂ + 2 n ₃ + n ₄ + n ₅ + n ₆ + n ₇ + n ₈ + n ₁₁
Carbono:	y m _c	= n ₃ + n ₅
Hidrógeno:	x m _c	= 2 n ₄ + 2 n ₆ + n ₈ + n ₁₀

En las ocasiones en las que la composición del aire se especifica con mayor detalle, se incluye también el número de moles de Argón como incógnita (n_{12}); pero también aparece una ecuación mas, correspondiente a su balance de masa. Esta situación no se va a contemplar en lo que sigue.

Además de las cuatro ecuaciones anteriores se puede añadir determinadas hipótesis dependiendo de las condiciones en que tiene lugar la reacción. En función de las hipótesis que se acepten se necesitarán más o menos ecuaciones para cerrar el problema. A continuación se desarrollan los casos más representativos:

a) Mezcla estequiométrica sin disociación.

Se consideran los siguientes productos de la combustión: N_2 , CO_2 , H_2O . Se tienen por tanto, cuatro ecuaciones (los cuatro balances de masas), para tres incógnitas (n_1 , n_2 , n_3). Las ecuaciones son:

$$\begin{aligned} z m_c + 2(0.79) n_a &= 2n_1 & (2.1) \\ y m_c + 2(0.21) n_a &= 2n_3 + n_4 & (2.2) \\ y m_c &= n_3 & (2.3) \\ x m_c &= n_4 & (2.4) \end{aligned}$$

De las ecuaciones (2.1), (2.3) y (2.4) se obtienen directamente las tres incógnitas:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0.79 n_a \\ n_3 &= Y m_c \\ n_4 &= X/2 m_c \end{aligned}$$

Para que el sistema no sea incompatible la segunda ecuación tiene que ser combinación lineal de las demás, lo que se traduce en una restricción, que es, en realidad, la condición de estequiometría. Se obtiene sustituyendo en la segunda ecuación los valores despejados de n_3 y n_4 :

$$n_a = \frac{2ym_c + \frac{x}{2}m_c - zm_c}{2(0.21)} = m_c \frac{4y + x - 2z}{4(0.21)}$$

y deshaciendo los cambios realizados al principio para n_a , X, Y, Z, la condición de estequiometría queda:

$$\left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{est} = 34.52 \frac{4n + m - 2p}{12n + m + 16p}$$

o escrita en forma más general:

$$\left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{est} = \frac{Pm_{(aire)}}{X\left(\frac{O_2}{aire}\right)} \frac{n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}}{12n + m + 16p}$$

b) Mezcla pobre sin disociación

Igual que en el caso anterior, la reacción está desplazada hacia los productos finales, que en este caso son: N_2 , CO_2 , H_2O , y O_2 . Se tienen, por tanto, cuatro ecuaciones (los cuatro balances de masas) y cuatro incógnitas (n_1 , n_2 , n_3 y n_4). Las ecuaciones son:

$$\begin{array}{rcl}
 & 2(0.79) n_a & = 2n_1 \\
 & (2.5) & \\
 Z m_c + & 2 (0.21) n_a & = 2n_2 + 2n_3 + n_4 \\
 (2.6) & & \\
 Y m_c & & = n_3 \\
 (2.7) & & \\
 X m_c & & = 2n_4 \\
 (2.8) & &
 \end{array}$$

De las ecuaciones (2.5), (2.7) y (2.8) se obtienen directamente las tres incógnitas n_1 , n_3 y n_4 :

$$\begin{array}{l}
 n_1 = 0,79 n_a \\
 n_3 = y m_c \\
 n_4 = x/2 m_c
 \end{array}$$

y sustituyendo en la segunda ecuación se obtiene la otra incógnita:

$$n_2 = \frac{1}{2} \left(z m_c + 2(0.21) \frac{m_a}{29} - 2y m_c - \frac{1}{2} x m_c \right)$$

Este coeficiente, n_2 , está relacionado con el coeficiente de exceso de aire, definido de diferentes maneras según la fuente, y establece la cantidad de oxígeno que no ha participado en la reacción. El coeficiente de exceso de aire tiene interés para quemadores, motores Diesel, etc.

c) Mezcla rica sin disociación

La reacción está desplazada hacia los productos finales, que en este caso son: N_2 , CO_2 , H_2O , CO y H_2 . Se tienen, por tanto, cuatro ecuaciones (los cuatro balances de masas) y cinco incógnitas (n_1 , n_3 , n_4 , n_5 y n_6). Las ecuaciones son:

$$\begin{array}{rcl}
 & 2(0.79) n_a & = 2n_1 \\
 z m_c + & 2 (0.21) n_a & = 2n_3 + n_4 + n_5 \\
 y m_c & & = n_3 + n_5 \\
 x m_c & & = 2n_4 + n_6
 \end{array}$$

Este es un sistema indeterminado, por lo que hace falta una quinta ecuación, esta ecuación consiste en suponer que la formación de CO y H_2 viene controlada por la reacción gas- agua:



Esta constante, está tabulada en la tabla 2.2, en términos de números de moles (K_n) con el fin de que el sistema de ecuaciones sea coherente, como una función de la temperatura.

Tabla 2.2 Constante k_{GW}

T [K]	K_{GW}
298.15	9.3756×10^{-6}
300	1.0617×10^{-5}
500	7.2611×10^{-3}
1000	0.69343
1500	2.5644
2000	4.5290
2100	4.8753
2200	5.2000
2300	5.5208
2400	5.8076
2500	6.0814
2700	6.5766
2800	7.2111

Los valores de la constante crecientes con la temperatura indican que cuanto mayor es la temperatura a la que tiene lugar la reacción, más desplazada está hacia productos finales, y por tanto finalmente habrá mayor cantidad de CO, y menor cantidad de H₂.

Se podría haber planteado cualquier otra reacción con la condición de que se conozca su constante de equilibrio, y el resultado sería el mismo. Se ha tomado la reacción de formación del CO por ser realmente una de las más significativas en este proceso.

d) Reacción de combustión en equilibrio con disociación

Intervienen en este caso las once especies:

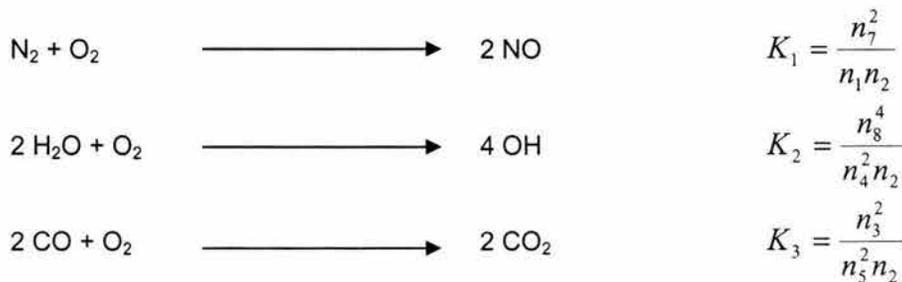


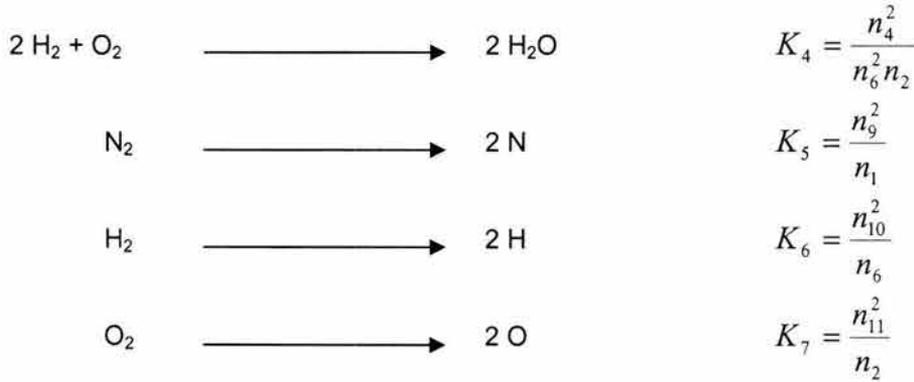
Aparte de los cuatro balances de masas, es necesario conocer las constantes de equilibrio de siete reacciones químicas en las que intervengan, algunas de estas especies, con el fin de formar un sistema de 11 ecuaciones con 11 incógnitas. Estas siete reacciones deben cumplir las siguientes condiciones:

- ✓ que sean independientes (no combinación lineal)
- ✓ que en ellas aparezcan todas las especies
- ✓ que se conozcan sus constantes de equilibrio

Si existen varios conjuntos de reacciones que cumplen estas condiciones conviene escoger aquellas que proporcionen un proceso de cálculo más sencillo.

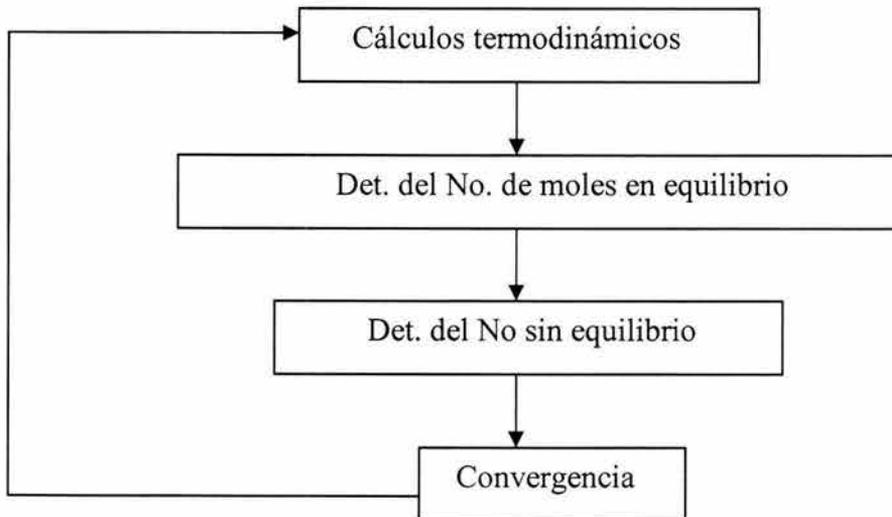
Los balances de masas son, en este caso, los planteados en el caso general, y como reacciones adicionales se pueden plantear las siguientes, habituales en la bibliografía:





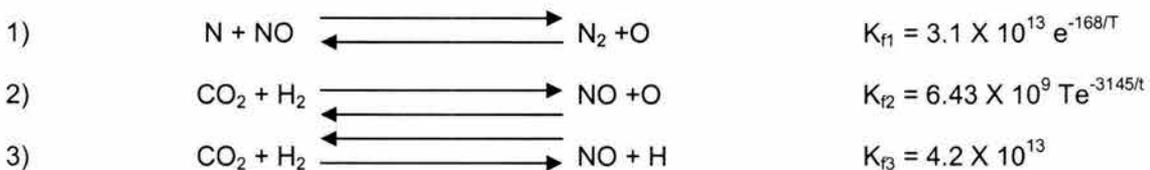
2.5.3 Formación de Óxidos de Nitrógeno

Para la determinación de la concentración de NO existe una serie de planteamientos cuya resolución se efectúa independientemente del resto del análisis, de manera que el esquema global de cálculo podría ser:



2.5.4 Mecanismo de Zeldovich.

Este método, que tiene su origen en la publicación de un trabajo en 1946 por el investigador ruso Y.B. Zeldovich, consiste en plantear, una vez resuelto el análisis de las reacciones en equilibrio anteriormente expuesto, las reacciones más características de los procesos de formación de óxido nítrico, reacciones que en el caso de un motor alternativo, no llegan a alcanzar el equilibrio. Aunque el mecanismo de Zeldovich se compone originalmente de las dos primeras de las reacciones siguientes, muchos autores añaden también la reacción entre el N y el OH, pasando a denominarse mecanismo extendido de Zeldovich. A la derecha de las reacciones, se indican los valores de las constantes K_f de cada una, en $\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{seg}$, obtenidos experimentalmente para el caso particular de los motores Diesel por Campbell y Trush:



Estas constantes K_f caracterizan la velocidad de cada reacción, y permiten, por tanto, en conjunción con el proceso físico concreto, en este caso el de un motor Diesel, determinar la concentración de óxidos de Nitrógeno tras el proceso de combustión. Dicha velocidad de reacción también se puede caracterizar por las constantes de las reacciones inversas. En efecto, las constantes de equilibrio de estas reacciones son conocidas, y aunque, como siempre, dependen de la temperatura, no dependen de las características del proceso de combustión:

$$K_1 = \frac{[N_2]_{eq} [O]_{eq}}{[N]_{eq} [NO]_{eq}}; \quad K_2 = \frac{[NO]_{eq} [O]_{eq}}{[N]_{eq} [O_2]_{eq}}; \quad K_3 = \frac{[NO]_{eq} [H]_{eq}}{[N]_{eq} [OH]_{eq}};$$

Por lo que cada una de las constantes de las reacciones inversas, K_b , igualmente específicas del proceso físico, se pueden despejar de:

$$K_i = K_{fi}/K_{bi}$$

2.5.5 Formación y oxidación de humos.

En todos los procesos de combustión tiene lugar una cierta generación de partículas sólidas, que tienen al Carbón como constituyente principal. Cuando estas partículas se forman en fase gaseosa suelen denominarse humos, mientras que aquellas que provienen de la pirolisis de hidrocarburos líquidos se suelen denominar partículas de carbonilla o de coque. Unas y otras ven favorecida su formación por la presencia de componentes con estructuras aromáticas en los combustibles. De las últimas solo se añadirá que pueden causar problemas de obstrucción de inyectores o de puntos calientes en paredes de cámaras de combustión al dificultar puntualmente la transmisión de calor.

El estudio de la formación de humos a través de la cinética química complicaría extraordinariamente el análisis anteriormente descrito, porque sería necesario incluir un gran número de reacciones en las que interviene una serie de diferentes Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH) con radicales libres, que son los productos intermedios precursores de las partículas de humo. Estas tienen como estructuras químicas unas redes de múltiples anillos aromáticos, con una proporción en peso de alrededor del 1% en peso de Hidrógeno. Para evitar un planteamiento de semejante envergadura, a menudo se recurre a expresiones semiempíricas que reproducen la velocidad de formación y oxidación de humos, en función de las condiciones locales donde se desarrolla la combustión.

La formación de humos tiene lugar en las zonas con ausencia de Oxígeno, con presiones y temperaturas altas, debido a que el combustible sufre una deshidrogenación. En una flama se pueden distinguir las zonas señaladas en la figura 2.1. donde Fr es el número de Frude.

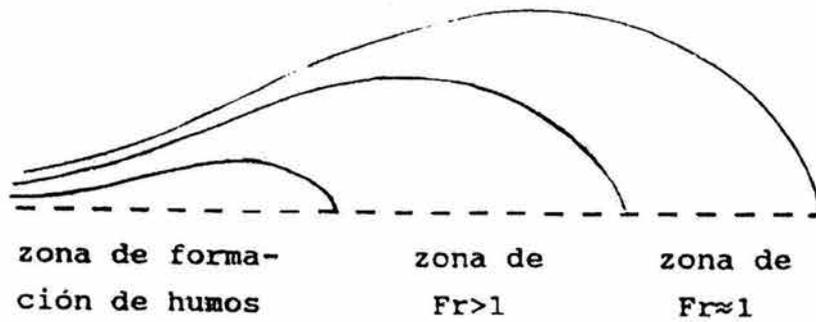


Fig. 2.1

Una vez formados, si existe exceso de Oxígeno los humos se oxidan para formar CO_2 y CO , reduciéndose la concentración de los mismos. El balance de ambos fenómenos se expresa por:

$$\frac{dm_h}{dt} = \frac{dm_{fh}}{dt} - \frac{dm_{oh}}{dt}$$

Utilizándose para el cálculo de la formación y oxidación de humos las expresiones propuestas por Hiroyasu:

$$\frac{dm_{fh}}{dt} = A_f m_{cg} p^{0.5} \exp\left(-\frac{6281}{T}\right)$$

$$\frac{dm_{oh}}{dt} = A_o m_h \frac{p(\text{O}_2)}{p} p^{1.8} \exp\left(-\frac{7035}{T}\right)$$

donde:

- $p(\text{O}_2)/P$ = fracción molar del O_2
- T = temperatura local, en este caso la de los productos quemados
- A_f, A_o = coeficientes a determinar por ajuste experimental
- m_{cg} = combustible gasificado sin quemar
- m_h = masa de humos presente en el cilindro

2.5.6 Formación de hidrocarburos sin quemar

Los hidrocarburos sin quemar aparecerán al no transformarse algunas porciones del combustible totalmente en productos de la combustión. Este fenómeno puede venir provocado por diversos mecanismos:

- i. Combustión incompleta. Este fenómeno ocurre cuando la mezcla es muy rica, debido a la imposibilidad de conseguir una mezcla homogénea.
- ii. Apagado de flama en la capa límite térmica. Tiene lugar en las proximidades de las paredes donde las temperaturas permanecen bajas. Se ve favorecido por la presencia de capas de aceite lubricante en el caso de las paredes móviles de motores alternativos.
- iii. Alojamiento del gas en rendijas, por ejemplo en huelgos entre partes móviles, donde difícilmente se pueden alcanzar las temperaturas adecuadas para que la combustión progrese.

- iv. Disminución de frentes de flama. Tiene lugar en regiones de la cámara de combustión en las que el nivel de turbulencia es tan bajo que la velocidad el frente de flama disminuye hasta el punto de que éste puede no barrer todo el volumen.
- v. Barrido de carga fresca. Este es un mecanismo específico de motores alternativos, especialmente de dos tiempos, en los que parte de la mezcla sin quemar es expulsada directamente por el escape.

Debido a que estos mecanismos son específicos de la aplicación donde se desarrolle el proceso, y dependen fuertemente de las condiciones de contorno particulares, no existen modelos válidos para procesos de combustión genéricos

CAPÍTULO 3

QUEMADORES

3.1 INTRODUCCIÓN

Los quemadores son dispositivos que permiten realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica especificada, y distribuyendo la zona de reacción (flama) y la circulación de los productos de combustión, de tal modo que se transfiera a la carga de la manera mas eficiente posible todo el calor producido, y además se debe cumplir con un nivel mínimo de contaminantes que se generan a través del proceso de combustión.

A continuación se presentan algunas características básicas para especificar un quemador:

- Tipo(s) de combustible(s).
- Rango de composición de los combustible que puede quemar .
- Calor transferido máximo, mínimo y normal.
- Rango de presión en el que opera el quemador.
- Máximo nivel de atomización a presión media para el encendido del combustible.
- Temperatura del combustible.
- Tipo de oxidante, ya sea aire, gases de combustión, u otro.
- Presión del aire de combustión, ya sea forzado (presión positiva) o inducido (presión negativa).
- Temperatura del aire de combustión.
- Temperatura en el hogar.
- Dimensiones del hogar para restringir las medidas de la flama.
- Tipo de flama (configuración o forma).

Según sea el combustible utilizado, los quemadores se clasifican; en quemadores de gas, de combustibles líquidos y de combustibles sólidos. En el caso de estos últimos, si la aportación de sólido se realiza neumáticamente (carbón pulverizado, por ejemplo) existe una cierta homogeneidad con respecto al equipo utilizado para los otros combustibles.

3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE UN QUEMADOR

Al adquirir un quemador de gas, el proveedor proporciona las curvas características, las cuales especifican la relación de calor suministrado, presión de inyección del combustible, composición del combustible y temperatura. Para un combustible gaseoso, ya sea compresible o incompresible, las curvas de capacidad son generalmente presentadas en términos del calor transmitido vs presión del combustible, el calor transferido es calculado a partir del gasto másico (o volumétrico) del combustible y multiplicado por el poder calorífico por unidad de masa (o volumen). Las figuras 3.1a y 3.1b muestran la curvas características de un quemador de gas y un quemador de combustible líquido respectivamente.

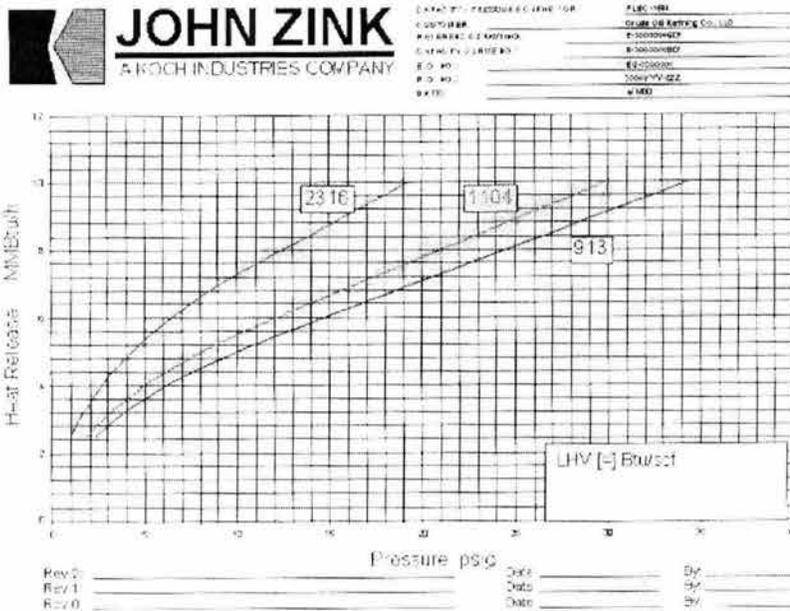


Fig. 3.1a Curva característica de un quemador de gas.

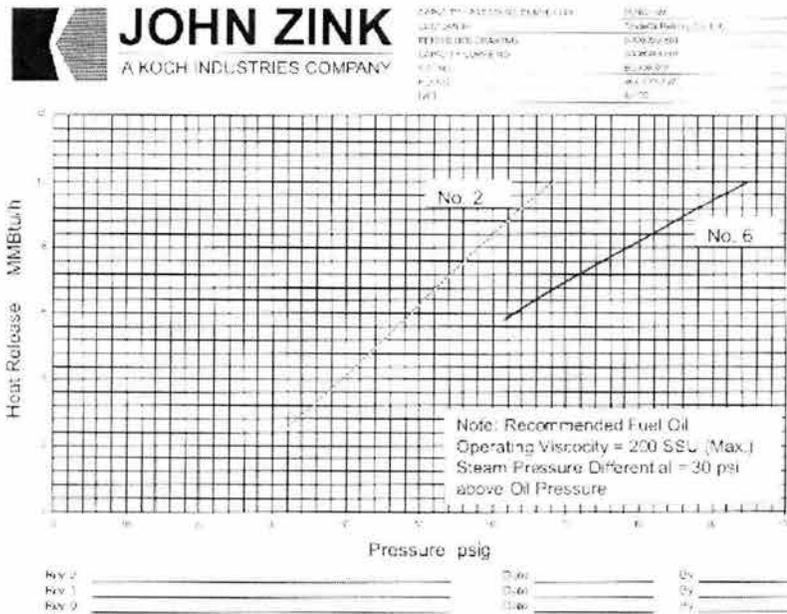


Fig. 3.1b Curva característica de un quemador de combustible líquido.

3.3 QUEMADORES INDUSTRIALES DE GAS

3.3.1 Criterios de Selección

Para especificar el equipo de combustión se aplican criterios de selección de carácter general relativos al quemador y de carácter específico, teniendo en cuenta la aplicación concreta y el tipo de cámara.

Criterios genéricos

- Temperatura a alcanzar. Lo que implicará principalmente tasas de aireación, reciclado, precalentamiento, oxigenación.
- Productos de la combustión. Selección de carácter oxidante o reductor de la atmósfera de la cámara, concentraciones de NO_x
- Flexibilidad de funcionamiento, que es la relación de potencia máxima y mínima a regulación nominal. Puede exigir modulación de tiempo de funcionamiento o la utilización de series de quemadores.
- Flexibilidad de regulación. Regulación de las tasas de aireación extremas entre las que el quemador funciona correctamente.
- Ruido.

Criterios específicos

Receptividad térmica del producto, que depende de:

- Conductibilidad térmica.
- Coeficiente absorción de la radiación.
- Superficie específica.
- Oxidación.

Receptividad térmica del horno:

- Aislamiento térmico.
- Inercia térmica.
- Paredes térmicas: crisoles, tubos radiantes.
- Vestíbulos de precalentamiento de la carga.
- Recuperadores de precalentamiento de aire.

3.3.2 Tipos de Quemadores

Los quemadores se pueden clasificar de distintas maneras, una de ellas es por la forma de alimentación del gas y del aire, tal como se visualiza en la Tabla 3.1

	Definición	Forma de mezclado	Método de control	Tipo de quemador	Aplicación típica
I	Alimentación aire gas separadas	No hay mezclado ambos llegan a presión	Manual: dos válvulas Automático: <ul style="list-style-type: none"> • Presiones equilibradas • Acoplamiento mecánico 		Hornos de vidrio Hornos de caliza Grandes instalaciones
II	Mezcla en boca	En el punto de combustión ambos llegan a presión	Como en I	De mezcla en boca con bloque de refractario	Calefactores de aire y Calderas Hornos de tratamiento
III	Premezcla parcial (requiere aire secundario)	Eyector de gas y aire atmosférico. Eyector de aire y gas a presión cero Mezclado mecánico (ambos a presión cero)	Manual o automático	Quemadores abiertos <ul style="list-style-type: none"> • Toberas • Inyectores • Lineales • Rampa 	Aplicaciones en las que se acepta exceso de aire Calentamiento
IV	Premezcla total por inducción	Eyector de gas y aire atmosférico Eyector de aire y gas a presión cero	Manual variable o automático fijo	Quemadores túnel cerrados Quemadores abiertos	Hornos de calentamiento Hornos de fusión Generadores
V	Premezcla total con mezclador mecánico	Sopladores, compresor, bombas ambos fluidos a presión cero	Ajustable o fijo Manual o automático	Como en IV	Como en IV si se requieren condiciones variables
VI	En función del caso				Procesos especiales

Tabla 3.1

3.3.2.1 Quemadores de premezcla

En estos, el combustible y el oxidante son completamente mezclados antes de que la combustión comience, en la figura 3.2 se muestra el esquema de un quemador de premezcla. Los quemadores de premezcla frecuentemente producen flamas cortas e intensas comparado con la difusión de la flama, con ello es posible producir altas temperaturas en una región pero tienen la desventaja de producir altas emisiones de NO_x. Los quemadores de flama radiante son usualmente de este tipo.

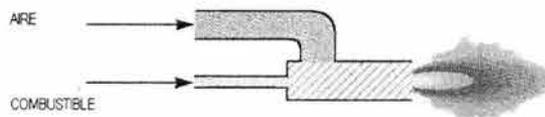


Fig. 3.2 Esquema de un quemador con premezcla

En una flama por difusión (fig. 3.3); por ejemplo la flama de una vela, el combustible y el oxidante están separados antes de iniciar la combustión, al producirse el proceso de combustión comienza la mezcla de combustible y oxidante, en este tipo de quemadores la flama es mas larga que el de un quemador con premezcla; sin embargo es posible tener quemadores parcialmente premezclados (ver esquema de la fig. 3.4) en donde una fracción del combustible se mezcla con el oxidante, este arreglo frecuentemente se realiza por cuestiones de seguridad y estabilidad, ya que ayuda al ancho de la flama y reduce el riesgo de que la flama retroceda a través de la garganta del quemador.

Otra clasificación basada en la premezcla es conocida como "pasos de aire y de combustible". Una premezcla por pasos se puede ver en las figuras 3.5 y 3.6, en este esquema se muestran los diferentes arreglos de premezcla aire-combustible y algunas veces se usan inyectores secundarios que se instalan en la base de la flama los cuales suministran ya sea combustible o aire al interior de la flama, esta condición incrementa la temperatura de la flama y la hace mas uniforme.

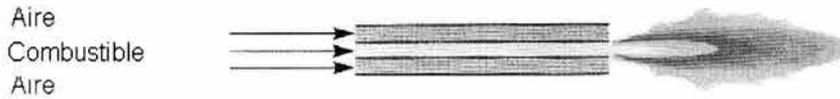


Fig. 3.3 Quemador de difusión

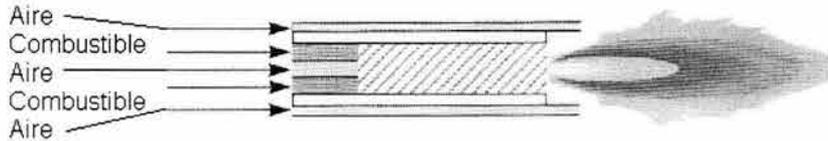


Fig. 3.4 Quemador con premezcla parcial

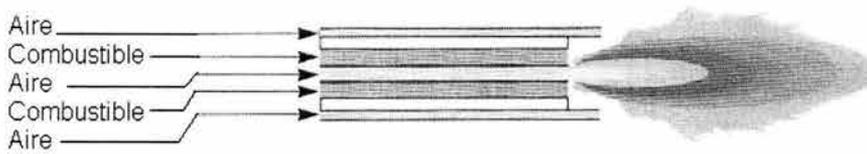


Fig. 3.5 Quemador con pasos de premezcla aire - combustible

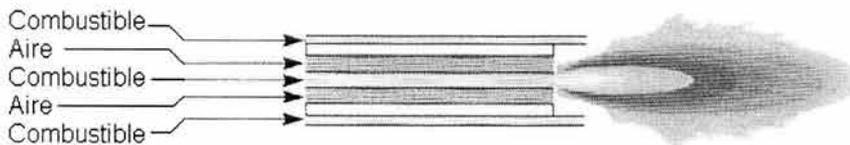


Fig. 3.6 Quemador con pasos de premezcla combustible - aire

3.3.2.1.1 Fenómenos involucrados en el quemador con premezcla

Los fenómenos a tener en cuenta en los quemadores con premezcla son los de retorno y desprendimiento de flama.

a) Fenómeno de retorno de flama.

Una pared fría ejerce una acción inhibitoria de la combustión. Existe un diámetro límite que es el mínimo requerido para que se propague la combustión. Su valor depende de la naturaleza de la mezcla y de la temperatura de la pared. También se define una distancia de seguridad, en la que se tiene en cuenta el calentamiento de las paredes por la flama. En la tabla 3.2 se dan los valores típicos para diversos combustibles.

Combustible	Diámetro límite [mm]	Diámetro de seguridad [mm]
H ₂	1	0.28
CO	2	0.56
CH ₄	3.3	0.93
C ₃ H ₈	3.4	0.96

Tabla 3.2

A bajos gastos de combustibles se produce un retroceso de flama hacia el mezclador, excepto si el orificio de salida tiene un diámetro inferior a la distancia de seguridad, o colocando una rejilla de malla inferior a ésa distancia (quemador Merker); o celdillas de refractario con diámetros adecuados.

En equipos grandes, estas protecciones son inaplicables y el sistema se protege garantizando un gasto mínimo. También puede protegerse el retorno en el tubo de premezcla rejillas o esponjas metálicas de mallas inferiores a la distancia de seguridad.

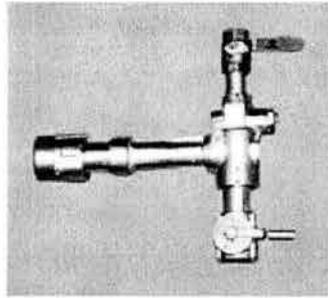


Fig. 3. 7 Quemador de premezcla. Para gas y aire a baja presión, puede obtenerse flama corta y de alto poder calorífico, se emplea para crisoles, hornos de temple, forjado, cementación, etc. Con capacidades de 3 – 140 m³/h.

b) fenómeno de desprendimiento o soplado.

Cuando aumenta el gasto, la flama se hace aérea e inestable y puede llegar a desprenderse. Se emplean dispositivos que contrarrestan el fenómeno: estabilizadores. Uno muy frecuente consiste en rodear la flama principal de flamas auxiliares de baja velocidad (ver fig. 3.8), cuando se trabaja al aire libre (antorchas); en los hornos, la estabilización se consigue con los refractarios.

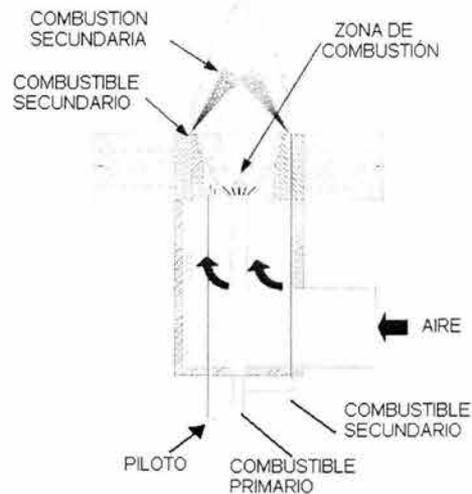


Fig 3.8 Quemador para caldera con flamas auxiliares

c) características de funcionamiento

Su flexibilidad es limitada:

- En potencia, por los límites de estabilidad. Raramente se consiguen en equipos industriales flexibilidades superiores a 1/4.
- En tasas de aireación, por razones de los límites de inflamabilidad.
- El retorno de la flama se evita, como se ha visto, reduciendo los orificios de alimentación. De ahí que la potencia de estos quemadores se limite a 200 kW para los de premezcla total y 500 kW para los de premezcla parcial.
- La recuperación también se dificulta en estos tipos por el riesgo de calentar las mezclas.

Sin embargo, se siguen utilizando por su:

- Elevada intensidad de combustión y temperaturas altas de flama.
- Elevada potencia específica del frente de flama.

Se emplean en trabajos de alta temperatura que requieren un desarrollo puntual de calor.

3.3.2.2 Quemadores atmosféricos

El quemador atmosférico de premezcla es aquel en el cual el gas combustible y el aire primario se mezclan previamente antes de llegar a la zona de combustión. Si el quemador es de gas inductor, a expensas de la energía cinética de éste se arrastra el aire atmosférico, véase figura 3.9; si es de aire inductor, a expensas de la energía de presión del aire se arrastra el gas, que generalmente se encuentra a una presión relativa al aire atmosférico nula. El calificativo de atmosférico se debe a que el aire primario es arrastrado desde la atmósfera por la corriente de gas, y también porque la combustión se realiza a presión atmosférica. El principio de funcionamiento fue desarrollado en 1855 por el químico alemán Robert Bunsen. En ellos el gas induce el aire atmosférico en el tubo de mezcla, en cuyo extremo se forma la flama. No se requiere ventilador de aire ni elementos mecánicos que regulen el gasto de aire en función del gasto de gas; una de las principales características de los quemadores atmosféricos es que usualmente la flama es de gran longitud y la temperatura en el extremo de la flama es baja.

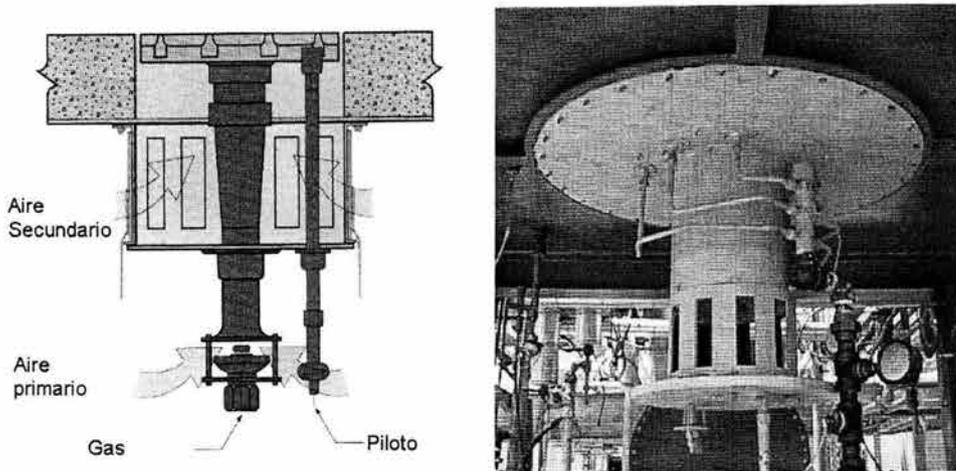


Fig. 3.9 Quemador atmosférico con arrastre natural de aire

Cuando en un quemador atmosférico de inyector fijo se hace variar la presión del gas, también cambia el gasto de éste, pero el gasto de aire aspirado no varía proporcionalmente.

Estos quemadores se usan, principalmente, en los aparatos domésticos de gas y tienen aplicaciones industriales limitadas; estos quemadores tienen potencias entre 50 y 200 kW. En la figura 3.10 se muestran estos tipos de quemadores.

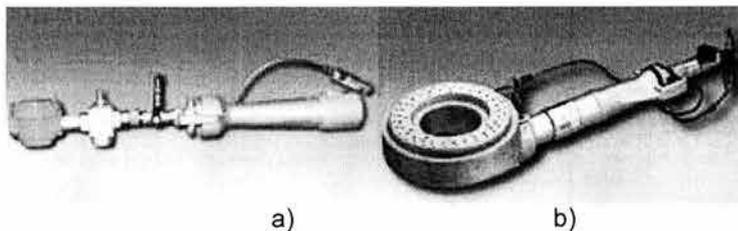


Fig. 3.10

- a) Quemador tipo atmosférico para baja presión de 2 kPa (0.02 bar) capacidad máxima de 52 kW en gas natural, con control de flama a termocople o electrónico, para aplicación en hornos de baja temperatura (panaderos, secadores, etc.)

- b) Quemador atmosférico radial para calentamiento de recipientes pequeños, este tipo de quemador es comúnmente usado en la industria petroquímica y química para el calentamiento de fluidos.

Principales elementos del quemador atmosférico.

Los elementos básicos del quemador atmosférico (Fig.3.11) de premezcla son:

- Inyector: Desde donde se descarga el gas combustible. El gas al expandirse actúa como fluido inductor, para arrastrar al aire primario de la atmósfera.
- Mezclador: Donde el gas y el aire arrastrado se mezclan, buscando siempre alivio de presiones y buen contacto entre aire y gas.
- Cabeza: Donde se efectúa la combustión de la mezcla aire - combustible, al fluir la mezcla por las boquillas.

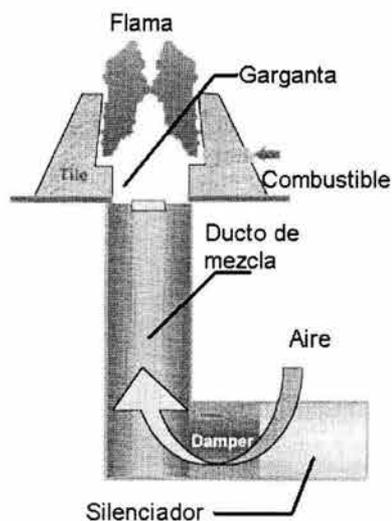


Fig. 3.11 Principales componentes de un quemador atmosférico

Los parámetros característicos del quemador atmosférico de premezcla son:

- Potencia térmica. Es la energía térmica por unidad de tiempo que se obtiene del quemador al reaccionar el combustible con el comburente.
- Rango de aireación primaria. Es la relación entre el aire inducido (aire primario) que admite el quemador y el aire teórico.

El funcionamiento óptimo de un quemador atmosférico se caracteriza por las siguientes condiciones:

- Máxima eficiencia.
- Buena combustión. La producción de Monóxido de carbono durante la combustión debe ser nula o estar dentro del rango establecido por las normas
- Emisiones de NOx dentro del rango establecido por las normas.
- Estabilidad de la flama.
- Flama sin puntas amarillas y sin producción de hollín.
- Operación silenciosa.
- Ignición correcta en las boquillas.

El funcionamiento óptimo de un quemador se logra cuando se establecen criterios precisos para su diseño y el quemador se opera con un adecuado ajuste de la relación aire/combustible en el momento de la combustión de un gas. El diseño del quemador y el ajuste de la combustión pueden verse influenciados por las condiciones atmosféricas del lugar donde se realiza la combustión, particularmente por la incidencia de la presión, temperatura y la higrometría

3.3.2.3 Quemadores oxi-gas

Se requieren cuando se desea temperaturas elevadas o flujos puntuales elevados de calor (sopletes).

Como combustibles se usan C_2H_2 , C_3H_8 , tetreno C_3H_6 y gas natural, en la tabla 3.3 se muestran valores típicos de estos combustibles.

Combustible	Temp. teórica de flama [°C]	Potencia esp. Frente de flama [kW/m^2]* 10^{-4}	Oxígeno teórico [m^3/kWh]	Tasa de oxígeno [np]	Oxígeno práctico [kW/m^2]* 10^{-4}
Gas natural	2 740	3.8	0.201	0.95	0.191
Propano	2 820	5.4	0.191	0.90	0.172
Tetreno	2 895	5.6	0.188	0.90	0.169
Acetileno	3 300	23.0	0.159	0.80	0.127

Tabla 3.3

3.3.2.4 Quemadores de mezcla en boca de salida con aire a baja presión

Se designan como tales cuando el aire tiene una presión del orden de 10 kPa y velocidades del orden de 10 a 15 m/s, siendo el combustible el que aporta la energía de mezcla.

En ellos se forman flamas de difusión axiales, algunas veces se disponen de toberas de doble impulso y en las que el gas sale por un inyector central a alta presión y una sección anular concéntrica a baja presión. El reparto de gasto entre ambas permite conseguir longitudes de flama variables a la misma potencia.

Como características generales de estos quemadores pueden citarse:

a) campo de aplicación. El uso de aire a baja presión es obligado en el caso de que se empleen recuperadores cerámicos ya que estos provocarían grandes pérdidas de presión si se usa aire a presión, a su vez el empleo de recuperadores cerámicos viene determinado por la exclusión de los metálicos, lo cual ocurre cuando las temperaturas sobrepasan los 400 - 500 °C. Casos típicos: vidrio y siderurgia.

b) características térmicas. En términos generales, las temperaturas efectivas de flama son tanto más elevadas cuanto más rápida se realiza la mezcla. La transferencia de calor en el horno es mejor cuando se eleva la temperatura.

c) cambio de combustible.

3.3.2.5 Quemadores de mezcla en la boca de salida y aire a presión

Se entiende por aire a presión cuando es generado con ventiladores centrífugos con valores del orden de 50 a 70 mbar e incluso a 100 mbar, logrando precalentarse a temperaturas de 400 - 500 °C en recuperadores metálicos. Las velocidades del aire son del orden de los 100 m/s.

3.3.2.5.1 Quemador de flama axial.

El aire puede llegar por un inyector central o por varias toberas; pero la longitud de la flama es imposible de calcular. Sin embargo:

- Dada una velocidad de aire, la longitud de flama y la mezcla son máximas cuando el aire y el gas tienen la misma velocidad.
- Dada una velocidad de gas, la longitud de flama y la mezcla disminuyen al aumentar la velocidad del aire; pero la transferencia de calor al horno aumenta.
- La transferencia de calor es mínima cuando ambas velocidades son iguales.

3.3.2.5.2 Derrame giratorio del gas

Entre las variantes, las más importantes se encuentran:

a) Flama mural o efecto pared.

En este tipo de quemadores la flama es circular y de espesor delgado, la flama se desarrolla de manera adyacente a lo largo de la pared, y se originan corrientes que fluyen hacia el centro de la cámara de combustión, la figura 3.12 muestra un quemador radiante así como la forma de su flama.

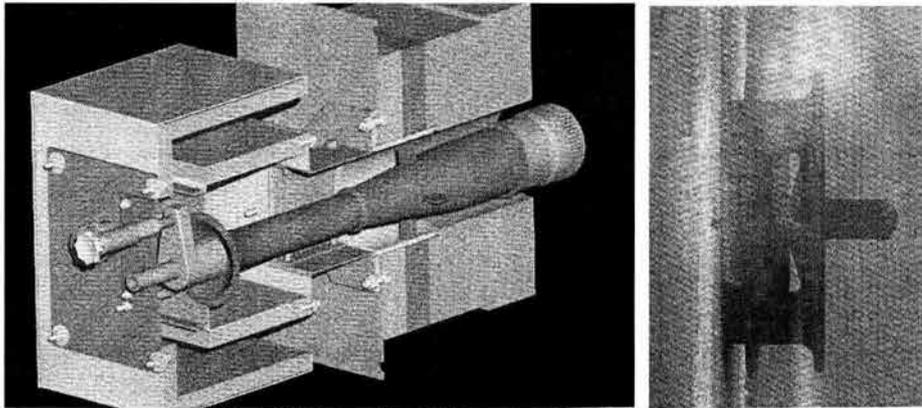
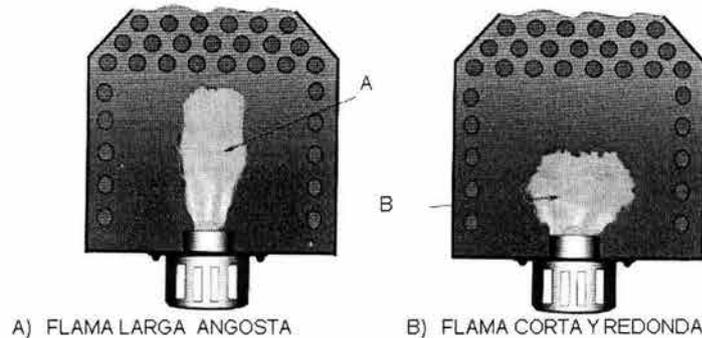


Fig. 3.12 Quemador de flama mural o efecto pared.

Se origina una importante radiación de la pared y alcanza altas temperaturas, se emplea principalmente cuando se requiere una transferencia uniforme de calor. Permite evitar el contacto de la flama al producto y reducir el volumen de la cámara de combustión.

b) Flamas en bola.

Permiten desarrollar flamas de gran intensidad. Pueden operar fácilmente en versión mixta.



A) FLAMA LARGA ANGOSTA

B) FLAMA CORTA Y REDONDA

Fig. 3.13 Formas de las flamas

3.3.2.5.3 Derrame a contra rotación.

La contra rotación se realiza aire contra aire y gas a baja presión, ó aire contra gas a alta presión. Se logran mezclas muy intensas y combustión rápida.

Este grupo de quemadores es el de mayor flexibilidad de funcionamiento y de mayor aplicación en el campo industrial. En cuanto al cambio de combustible, se logra fácilmente por regulación.

Un método auxiliar para aumentar la temperatura de flama es recuperar y precalentar el aire. Cuando las condiciones, son aproximadamente las estequiométricas, una elevación de la temperatura del aire de 100 °C, eleva en 50 °C la temperatura de la flama.

3.3.2.6 Quemadores especiales

Quemadores radiantes.

Se denominan así cuando una parte importante de la transferencia de calor se realiza por radiación al medio, en general, de una superficie de refractario.

Se denomina rendimiento de radiación a la proporción de energía de PCI que se transmite por radiación. Entre los distintos tipos, se pueden citar los paneles radiantes, en los que se utiliza en general un mezclado de inducción, estos dan un rendimiento de 50 al 60%. Los de alta temperatura, que se alimentan en premezcla total, queman el gas en multi-canales de unos 20 mm de diámetro. El rendimiento es del orden del 20%. Se alimentan en premezcla total y adoptan diversos modelos, alcanzan rendimientos de 15% a 1000°C.

Quemadores Jet.

Lanzan a gran velocidad (> 100 m/s) los productos de una combustión completa o casi. El chorro se lanza sobre el producto a calentar o sobre la atmósfera provocando su recirculación. Consta de un dispositivo de mezcla, una cámara de combustión y un orificio o tobera de salida. La presión en la cámara de combustión varía entre 1 y 6 kPa.

Quemadores de vena de aire.

Se han desarrollado para calentar aire de secado o calefacción. Se construyen del tipo modular para permitir constituir formas diversas. La potencia lineal máxima es de 500 a 1000 kW (PCI)/m en los quemadores que son alimentados con gas puro y de 1000 kW/m en los de premezcla. Se alcanzan temperaturas de 400° C.

A veces se instalan para asegurar la incineración de efluentes, en cuyo caso, la condición es que el O₂ sea > 18% y la temperatura de ataque < 540 °C y la incineración se hace a 800 - 850 °C y la potencia lineal > 900°C..

3.3.2.7 Quemadores para altas temperaturas

Se denominan generalmente, como zonas de altas temperaturas, la que se extiende por encima de los 2730 °C hasta la región de las temperaturas de las reacciones nucleares 100 000 000 °C. Los medios para alcanzar la zona intermedia próxima de la descrita, comprendida entre los 1730 °C y 2730 °C, se limitan casi exclusivamente a la reacción química: la combustión de combustibles convencionales. Estos, en general proporcionan temperaturas del orden de 1730 °C los cuales pueden elevarse:

- a) por enriquecimiento de combustible con oxígeno, que permite alcanzar los 2730 °C.
- b) precalentamiento del aire de combustión con el calor de los gases de salida; según el sistema adoptado, es posible alcanzar los 2230 a 2330 °C.
- c) mediante el uso de la electricidad (electro-quemadores) para producir ionización o generar plasma, pudiendo así alcanzar e incluso superar los 2726 °C.

3.4 QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

El objetivo fundamental de un quemador de combustibles líquidos será, introducir el combustible en la cámara de combustión convenientemente pulverizado, en la figura 3.14 se muestran las boquillas típicas para combustible líquido, estas boquillas producen el efecto de radiación de la flama para que cada una de las gotas formadas se vaporice y reaccione con rapidez., para ello es necesario que el combustible haya sido previamente filtrado y llevado a la presión y temperatura adecuada en el grupo de preparación.

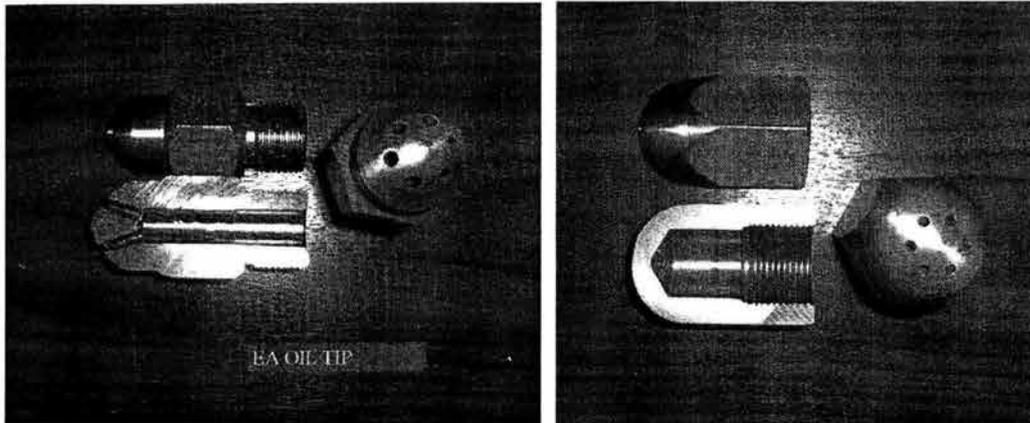


Figura 3.14 Boquillas atomizadoras para combustible líquido.

3.4.1 Partes Constitutivas Principales de un Quemador de Combustible Líquido.

Un quemador automático comprende:

- Un conjunto de órganos para la preparación, la circulación y la pulverización del combustible, que puede estar integrado por una o varias bombas, reguladoras de presión o de gasto de combustible, de dispositivos de seguridad y elementos auxiliares.
- Un conjunto de órganos para la alimentación del aire de combustión integrado por un ventilador, reguladores de gasto de aire, de dispositivos de seguridad y elementos auxiliares.
- Una o varias cabezas de combustión.
- Un dispositivo de encendido y seguridad.

Y eventualmente un conjunto de órganos para la producción, la circulación y el control del fluido auxiliar de pulverización.

3.4.2 Tipos de Clasificaciones.

Existen dos clases fundamentales de quemadores de combustibles líquidos que a continuación se presenta; sin embargo, posteriormente se hace referencia a otros tipos de clasificaciones.

3.4.2.1 Quemadores de gasificación o vaporización.

En los que la flama, por radiación sobre la superficie de combustible líquido, produce la vaporización de éste, el cual se incorporan a la flama y mantiene la combustión. Este sistema tiene una doble limitación en uso: por un lado, se aplica a quemadores pequeños con (15 kW); por el otro, sólo es aplicable con combustibles ligeros. Ejemplos típicos de estos quemadores son los vaporizadores de gasolina, los quemadores de queroseno con mecha y los antiguos quemadores domésticos en los que el combustible se vaporizaba sobre una placa calentada por una flama.

3.4.2.2 Quemadores de pulverización.

Es el quemador de combustible líquido en el cual la inflamación del combustible es precedida de una fase de preparación que consiste en reducir el combustible a partículas finas. Este tipo de quemadores son los que generalmente se emplean. El combustible para ser pulverizado, debe tener baja viscosidad, del orden de $0.00001 \text{ m}^2/\text{s}$ (10 centistokes) que sólo presentan a baja temperatura los gasóleos, y para que el Diesel tenga esta viscosidad se requiere calentar a $110 \text{ }^\circ\text{C}$.

Los quemadores de combustibles líquidos de pulverización se clasifican como sigue:

1) Por rotación.

También se les conoce como quemadores de copa rotativa o de pulverización centrífuga. En ellos el combustible se inyecta a baja presión en una copa que gira de $2\ 500 - 7\ 000 \text{ rpm}$, impulsando así al líquido en forma de lámina cónica que rompe en forma de finas gotas.

En los quemadores de este tipo (Figura 3.15), la boquilla está constituida por una pieza troncocónica o copa, que gira a velocidad elevada ($2\ 500$ a $7\ 000 \text{ rpm}$) accionada por un motor eléctrico. Bajo la acción de la fuerza centrífuga, el combustible avanza adherido a sus paredes en forma de película muy fina, hasta alcanzar finalmente el borde exterior de la pieza desde el que penetra en la cámara de combustión. Allí, el cono divergente de combustible choca con la corriente de aire, que es impulsada por un ventilador, sale del quemador rodeando la lámina de combustible que abandona la copa, produciéndose de este modo su pulverización en forma de niebla de gotas muy pequeñas. El aire, a baja presión, se introduce en el espacio anular. La forma de la flama puede ajustarse variando la velocidad del aire (al aumentar esta, la llama se alarga) y la velocidad de giro (al aumentar la flama, tiende a ensancharse).

Los quemadores rotativos se utilizan frecuentemente en instalaciones industriales de capacidad media y pequeñas calderas con hogares en depresión o poco presurizados. Deben siempre disponerse en posición horizontal, es decir situados en las paredes laterales de la cámara de combustión. Están dotados de una aceptable flexibilidad, pero el control de la forma de la flama es en ellos limitado, tienen la tendencia al ensuciamiento por formación de depósitos carbonosos. Para su buen funcionamiento la viscosidad del combustible que se desplaza en la copa debe estar comprendida entre los 0.0318 Pa s (31.80 cP) y 0.0765 Pa s (76.5 cP), por lo que trabajan normalmente con combustibles de media y alta fluidez, no siendo adecuados para la combustión de gasóleos.

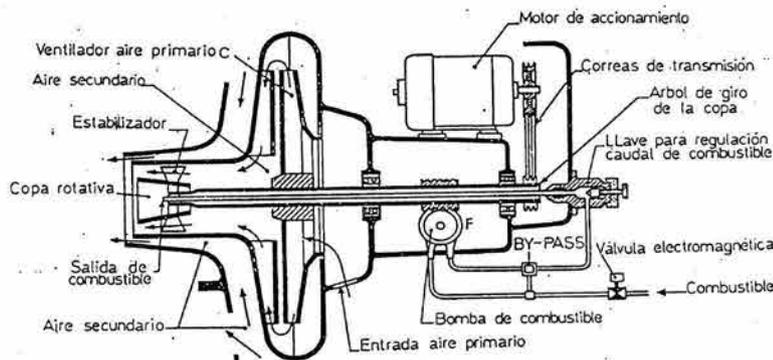


Fig. 3.15 Quemador de copa rotativa

2) Por presión de combustible.

El combustible a una presión de 1 a 10 kPa , sale por una tobera a la cámara, pulverizándose por la expansión. Se regula modificando la circulación del combustible (ver fig. 3.16)

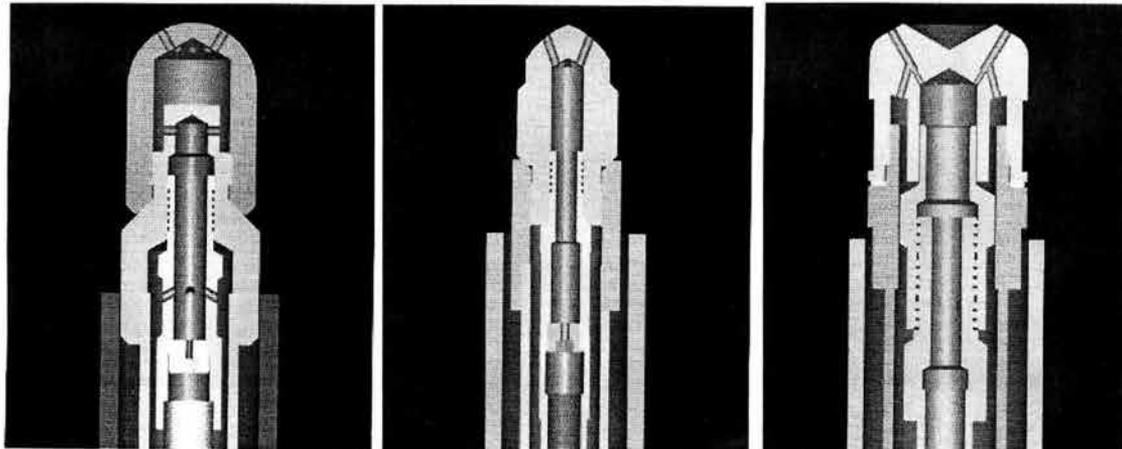


Fig. 3.16 Configuraciones típicas de atomizadores de combustible líquido

Trabajan con presiones del combustible que dependen de su viscosidad. En general, se recomienda que ésta no supere los $8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (8 cSt); pero hay diseños que permiten los $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (20 cSt).

Permiten trabajar con bajos excesos de aire, del orden de 5 -10 %; se pueden obtener flamas de gran tamaño; la potencia de pulverización es pequeña; al no existir partes móviles expuestas a la radiación, constituyen un sistema muy seguro; la regulación es sencilla (por presión del combustible); pero poco flexible, por lo que en grandes instalaciones se deben colocar varios elementos con regulación individual todo-nada.

En los quemadores de este tipo, las boquillas disponen de una serie de canales tangenciales (figura 3.17) por los que es obligado a circular al combustible a presión, con lo que adquiere un movimiento helicoidal. De esta forma, a la salida de la boquilla, cada molécula de combustible lo hará con una velocidad V , (figura 3.17), resultante de una componente V_n paralela al eje y otra V_t , tangente al orificio de salida, con lo que el conjunto de moléculas será impulsado en el interior de la cámara de combustión en forma de cono más o menos hueco, ya que la fuerza centrífuga aplicada al combustible en rotación proyectará a éste contra las paredes del boquilla, ocupando la zona central una masa de aire dotada asimismo de un movimiento turbulento. La apertura del cono de combustible será tanto mayor cuanto más elevada sea la relación V_t / V_n entre los componentes de la velocidad de salida de sus moléculas.

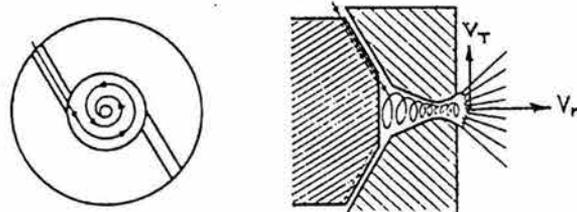


Fig. 3.17 Quemador de pulverización mecánica

La calidad de la flama obtenida en una boquilla, y por lo tanto su especificación viene establecida por las siguientes características:

- Gasto de combustible
- Angulo del cono de salida
- Dimensiones de las gotas
- Uniformidad de la mezcla aire / combustible y de la distribución de las gotas.

Estas características son función, a su vez, de otras dependientes del diseño de la propia boquilla, de la presión de inyección del combustible y de la naturaleza y viscosidad de éste.

El ángulo del cono de combustible a la salida de la boquilla dependerá, en primer lugar, del diseño de la propia boquilla y en particular, del valor de la relación (S/s) entre las áreas de la sección de salida de la boquilla y la de cualquiera de los canales tangenciales en los que el combustible adquiere su movimiento giratorio.

El ángulo del cono de salida depende también de la presión del combustible, disminuyendo al aumentar ésta, lo que aumenta la longitud de la flama como ya fue indicado. Asimismo es función de la viscosidad, disminuyendo cuando ésta crece al reducirse la componente de V_T de la velocidad de salida respecto de la V_N .

Evidentemente la calidad de la combustión será tanto mejor cuantas más pequeñas sean las gotas del combustible pulverizado, considerándose en la práctica como satisfactoria aquellas pulverizaciones en las que el diámetro medio de las gotas producidas está comprendido entre las 30 y 150 micras.

En la práctica industrial no todas las gotas tienen el mismo diámetro, debiéndose compensar la mayor dificultad de combustión de las más gruesas con la presencia de otras más pequeñas. De esta forma se llega al concepto de diámetro medio de la pulverización o S.M.D. (Surface Mean Diámetro), denominado también número de Sauter. Tal designación se aplica al diámetro de las gotas producidas en una pulverización ideal, en la que todas ellas tienen igual diámetro y cuya superficie específica es idéntica a la conseguida con la pulverización real. Evidentemente, la combustión será tanto más sencilla cuanto menor sea su número de Sauter.

El número de Sauter crece aproximadamente con la raíz cuadrada del diámetro de la sección de salida de la boquilla, lo que constituye una limitación adicional del caudal en los quemadores de pulverización mecánica que aconseja, al igual que sucedía con la presión, atender los grandes consumos con varias unidades de pequeño diámetro en lugar de hacerlo con una sola más grande.

El número de Sauter varía también con la presión de inyección, disminuyendo con ella y con la viscosidad del combustible, con la que aumenta.

2.1) Boquillas especiales.

De lo anteriormente expuesto se deduce la gran limitación que representa para los quemadores de pulverización mecánica la dependencia tan estrecha que existe entre el caudal que proporcionan y la presión de inyección del combustible.

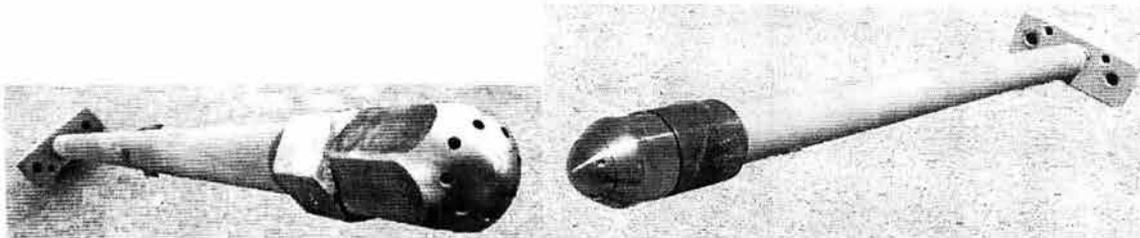


Fig. 3.18 a) Boquillas estándar b) boquillas especiales de alta eficiencia

Para realizar tal dependencia, ampliando en lo posible el campo de regulación de la boquilla y por consiguiente su flexibilidad ante cargas variables, se han introducido diversas modificaciones en su diseño, de las que destacan, por su aplicación más extendida, las siguientes:

- Boquillas con retorno.
- Boquillas de pistón o de ranuras variables.
- Boquillas de doble circulación.

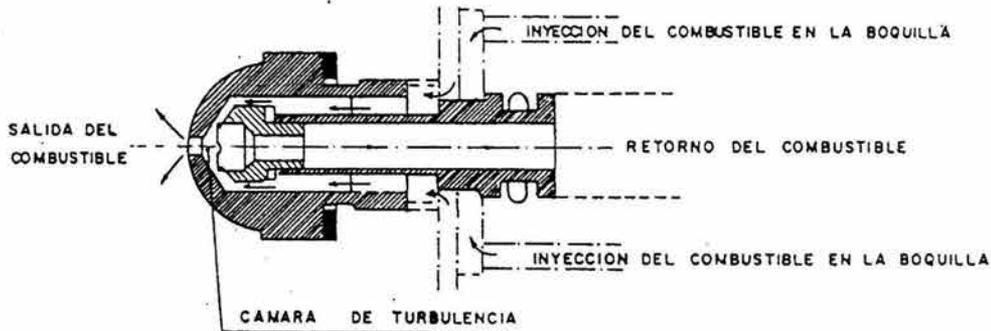


Fig. 3.19 Boquilla con retorno

En las boquillas con retorno (figura 3.19) el gasto total del combustible a pulverizar se introduce en la cámara de turbulencia, volviendo una parte del mismo, variable según la carga, hacia la aspiración de la bomba a través de una tubería central de retorno, e inyectándose el resto en el interior de la cámara de combustión. Con esto se consigue que la velocidad de rotación del combustible, factor esencial para su buena pulverización, sea independiente de la carga de la instalación. El caudal se regula mediante la apertura o cierre de una válvula colocada en la tubería de retorno.

En las boquillas de ranuras variables, la sección de las ranuras tangenciales de la boquilla varía con el gasto, manteniéndose de este modo la velocidad de rotación constante en todo el campo de regulación del quemador. En la figura 3.20 se muestra una boquilla de este tipo, en la que la variación de la sección de las ranuras se consigue mediante el accionamiento de un pistón.

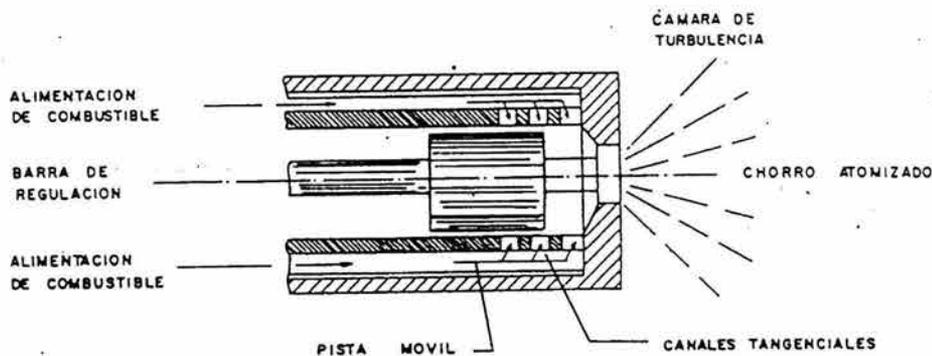


Fig. 3.20 Boquilla de ranura variable

En las boquillas de doble circuito (Figura 3.21) la tubería que conduce al combustible desde la bomba se divide en dos antes de llegar a la boquilla, regulándose el flujo por cada una de ellas mediante la correspondiente válvula.

La característica, de este tipo de boquillas, es la de poder regular fácilmente la apertura del cono. El circuito primario, que introduce el combustible en la cámara de turbulencia por ranuras que giran a alta velocidad, imprimiendo un fuerte movimiento, con lo que se consiguen gotas muy finas, obteniendo la máxima divergencia en la atomización.

Por el contrario, el combustible que accede a la cámara de turbulencia a través del circuito secundario, lo hace por el centro de la misma, en dirección paralela al eje del quemador, con lo que se reduce la velocidad de rotación generada en el circuito primario, limitando y regulando así la divergencia del chorro, a la vez que aumenta el caudal de salida.

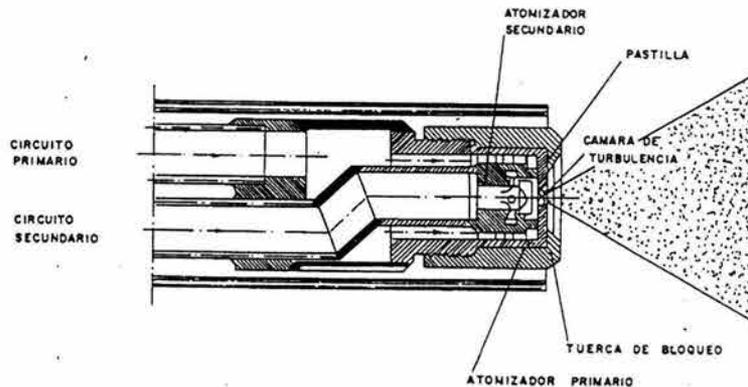


Fig. 3.21 Boquilla de doble circuito

2.2) Tamaño de los quemadores.

De lo anteriormente expuesto se deduce que el tamaño máximo de los quemadores de pulverización mecánica viene establecido por la dificultad de obtener en ellos una pulverización fina para grandes caudales, así como una longitud de flama adecuada al espacio disponible en la cámara de combustión. Así, por ejemplo, la flama de un quemador que consume una tonelada de combustible por hora es, aproximadamente, un 30 % más corta que la de otro quemador que consume dos toneladas. Esta es la razón por la que no se construyen quemadores de este tipo para gastos superiores a las 2 t / h.

En lo que a presión de inyección se refiere varía entre amplios límites, en base al caudal a suministrar por el quemador y la naturaleza del combustible empleado, siendo las normales las siguientes:

De 784 a 1 176 kPa para gasóleo

De 1 176 a 2 451 kPa para el Diesel industrial.

2.3) Suministro del aire de combustión.

Los quemadores de pulverización mecánica pertenecen al grupo de los disociados en los que el aire y el combustible avanzan por separado hasta encontrarse en la cámara de combustión.

La circulación del aire, impulsado por un ventilador, se produce a lo largo de un conducto o cajón de aire que rodea concéntricamente al quemador por la que avanza el combustible hacia la boquilla de pulverización.

La entrada del aire puede realizarse en cualquier orientación (vertical superior o inferior, lateral, etc.) según las disponibilidades de espacio. Para pequeñas potencias el ventilador va colocado normalmente sobre el propio cajón de aire, en disposiciones monoblock, con la condición de resolver eficazmente el problema de las vibraciones que se presenta. Esta disposición ahorra espacio reduciendo además los costos de instalación.

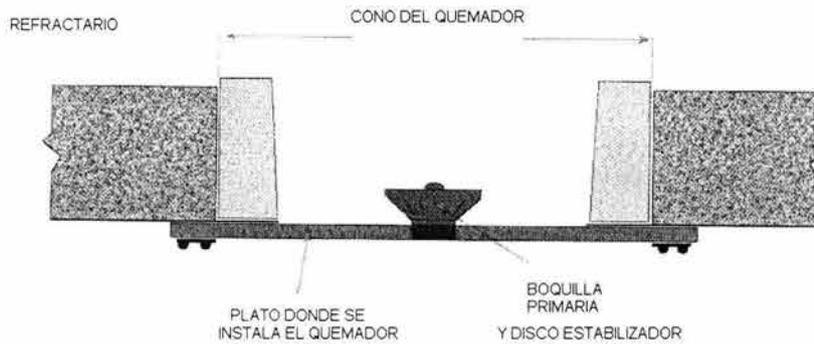


Fig. 3.22 Conjunto de un cabezal de combustión

En el interior del cajón de aire va colocado un difusor estabilizador, (ver figura 3.22) normalmente orientables y de disposición axial o radial, por las cuales atraviesa el aire y se crea la turbulencia necesaria para que, al encontrarse en la cámara de combustión con el chorro de combustible, se produzca la mezcla entre ambos fluidos necesario para una buena combustión.

En el extremo final del cajón de aire y en las proximidades de la boquilla se encuentra el difusor (figura 3.23), pieza consistente en un disco o cono perforado, cuya misión es la de crear un área de baja presión en la zona central de la vena del combustible que permita estabilizar correctamente la flama en el interior de la cámara de combustión. Por ello, normalmente, la posición del difusor no es fija, siendo posible desplazarlo ligeramente respecto de la posición de la boquilla para regular convenientemente la distribución del aire en el cabezal de combustión.

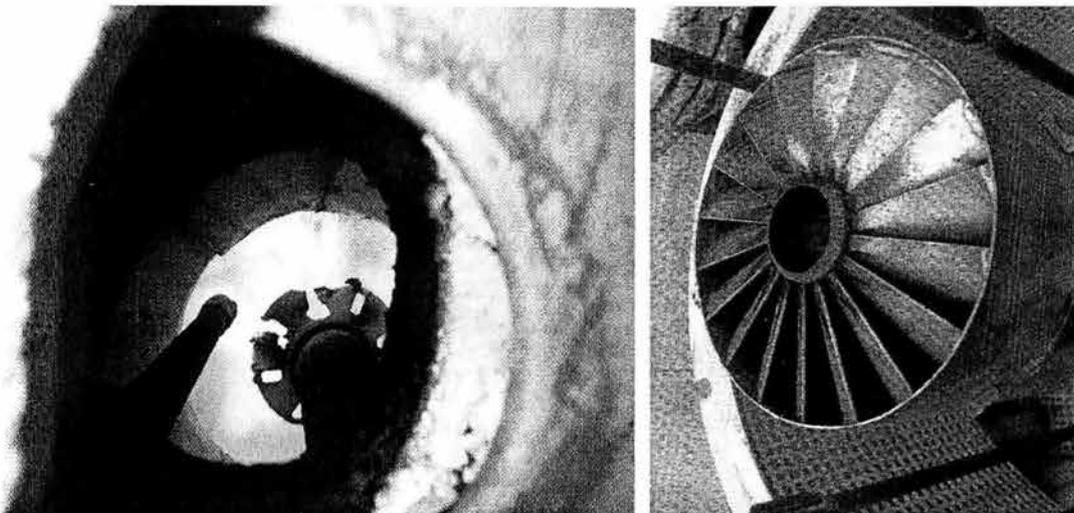


Fig 3.23 Difusores para quemadores de combustible líquido

3) Quemadores de pulverización.

3.1) Quemadores de pulverización por fluido auxiliar.

Utiliza presiones de aire o vapor de agua desde los 10-35 kPa hasta los 100 kPa. El consumo de vapor varía de 0.1 a 0.5 kg_v/kg_c , y el del aire, de 0.2 a 0.8 kg_a/kg_c , según el diseño y dimensiones del atomizador y la viscosidad del combustible.

Existen diseños con mezcla exterior, en los que el combustible líquido y el fluido impulsor llegan

separadamente a la boquilla de mezcla interior, conformada por una cámara de mezcla y descargando en una tobera. En los de primer tipo, se recomiendan presiones de combustible del orden de 30 a 80 kPa; en los de segundo tipo, la presión de combustible debe ser la misma que la del fluido de arrastre. En los quemadores de este tipo, la energía que se necesita para pulverizar el combustible es aportada por un fluido auxiliar normalmente aire o vapor de agua (figura 3.24), presentando sobre los quemadores de pulverización mecánica la ventaja de disponer de una mayor flexibilidad de marcha y un control mucho mejor de la geometría de la flama, siendo además posible quemar en ellos prácticamente la totalidad de los combustibles líquidos existentes.

Para la mayoría de las aplicaciones la pulverización se realiza con aire, pero cuando se queman combustibles de alta viscosidad, como lo son los derivados del alquitrán de hulla o los Diesel residuales, es preferible utilizar vapor de agua para realizar la atomización, ya que proporciona calor, además de la presión necesaria para la pulverización.

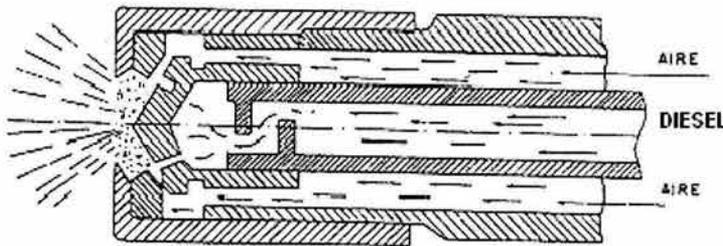


Fig. 3.24 Boquilla atomización con aire

Los quemadores en los que se produce la pulverización por aire comprimido se clasifican conforme al valor de la presión a la que ésta se realiza, diferenciándose de este modo los siguientes:

- Quemadores de baja presión, para valores inferiores a los 9.8 kPa, en los que se pulverizan combustibles con viscosidad comprendida entre los 0.0202 Pa s (20.2 cP) y 0.0451 Pa s (43.1 cP). Se utilizan, entre otras aplicaciones, en hornos de panadería, fundiciones al crisol y secadores de grano. En el pasado fueron también ampliamente utilizados para calefacción doméstica. En ellos, la cantidad de aire destinada a la atomización varía, según los casos, desde un 10 a 15 %, hasta el total del necesario para la combustión. En este último caso, la boquilla se transforma en un verdadero quemador, ya que no solo se atomiza el combustible, sino que también se mezcla con el aire de combustión.
- Quemadores de presión media, con valores comprendidos entre 9.8 y 98 kPa. Se utilizan en la fundición del vidrio, hornos de tratamiento térmico y de calentamiento de trenes de laminación. Necesitan para la pulverización aproximadamente el 50 % del total de aire necesario para la combustión, suministrándose el resto, como aire secundario, mediante un ventilador.
- Quemadores de alta presión, en los que la pulverización se realiza con aire comprimido por encima de 98 kPa, destinándose a ella el 25 % aproximadamente del total del aire necesario. El costo de compresión de este último sólo queda justificado cuando se necesita un elevado grado de precalentamiento del mismo.

3.2) Quemadores de emulsión.

Los quemadores de emulsión constituyen un perfeccionamiento importante de los de pulverización por aire que acaban de ser descritos. En ellos, la mezcla del combustible con el aire de pulverización, se realiza durante la compresión de este último, con lo que el combustible se fluidifica aprovechando el calor producido en el proceso.

Los quemadores de este tipo (Figura 3.25), constan, en esencia de una bomba volumétrica D, que envía el Diesel perfectamente dosificado al compresor de aire E, en cuyo interior, se produce la emulsión en forma de pequeñas gotas huecas de combustible, llenas de aire que constituyen una

mezcla íntima de ambos que arde con suma facilidad, reduciendo de forma sensible el aire necesario para su combustión completa.

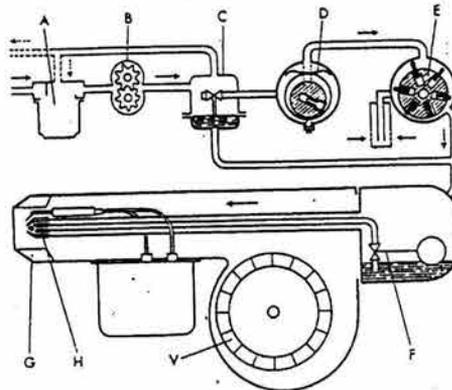


Fig. 3.25 Quemador de emulsión A) Filtro, B) bomba de engranes, C) Válvula de seguridad D) Bomba volumétrica, E) Compresor, F) Separador de gotas, G) boquilla, H) Pulverizador

Existen quemadores de este tipo en los que el combustible se emulsiona con una mezcla de aire y agua perfectamente dosificada (figura 3.26). De esta forma, al acceder a la cámara de combustión una gota de la emulsión citada, el agua se vaporiza, con lo que aumenta sensiblemente de volumen, fraccionando la gota inicial en multitud de otras más pequeñas, favoreciendo enormemente la combustión y disminuyendo además la temperatura de la flama, lo que reduce la producción de óxidos de nitrógeno.

La llegada del combustible a la bomba D se efectúa a través de una válvula de cierre C, accionada por un dispositivo de membrana, que está conectada a la tubería de impulsión del compresor de aire E. La misión de dicha válvula es la de impedir el paso de combustible a la bomba volumétrica cuando la presión de salida del compresor es insuficiente, por lo que constituye un dispositivo de seguridad que provoca el apagado del quemador, tan pronto como la emulsión no se realice correctamente, lo que implica el riesgo de llegada a la cámara de combustión de combustible líquido no pulverizado.

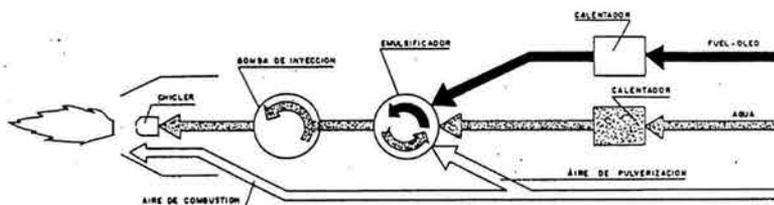


Fig. 3.26 Quemador de emulsión con mezcla de agua y aire

3.3) Atomización con vapor

Los quemadores que realizan la pulverización del combustible por medio del vapor de agua son particularmente apropiados para la combustión de combustibles pesados, por aportar junto a la energía, parte del calor necesario para su calentamiento hasta la temperatura de pulverización.

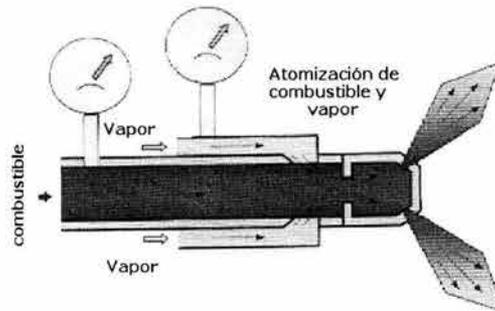


Figura 3.27

Otras ventajas adicionales de la pulverización con vapor es que se eliminan los residuos carbonosos que se acumulan en las toberas, proporcionan un amplio campo de regulación del quemador, del orden de 1:10 y permiten controlar fácilmente la forma y longitud de la flama. La figura 3.27 muestra una tobera de atomización con vapor de agua en la que el combustible fluye por el tubo central y el vapor por el exterior.

En la Fig. 3.28 se puede observar la configuración de un quemador escalonado para combustible líquido aire-combustible-aire con vapor, en este tipo de quemadores normalmente hay tres registros de aire para el control de la relación de aire y una boquilla para la entrada de combustible, algunos diseños solo tienen dos entradas de aire. Si el quemador cuenta con tres entradas de aire o dampers, cada uno de estos tendrá que ser ajustado correctamente para minimizar la producción de NO_x . El registro primario está normalmente abierto para mantener la flama, el registro secundario controla la cantidad de aire a través de la garganta del quemador y el registro terciario controla el flujo de aire que pasa por un by-pass y es mezclado dentro de la flama. Para comenzar el ajuste, el registro primario puede estar totalmente abierto y estabilizar la flama, el registro secundario y terciario se abren al 50 %, el ajuste del registro secundario se realiza con ayuda de un analizador de oxígeno en los gases de combustión y el registro terciario se ajusta con la ayuda de un analizador de NO_x para obtener la apertura óptima. Si los NO_x no es posible reducirlos, entonces se cierra el registro primario y se inicia nuevamente la secuencia de ajuste.

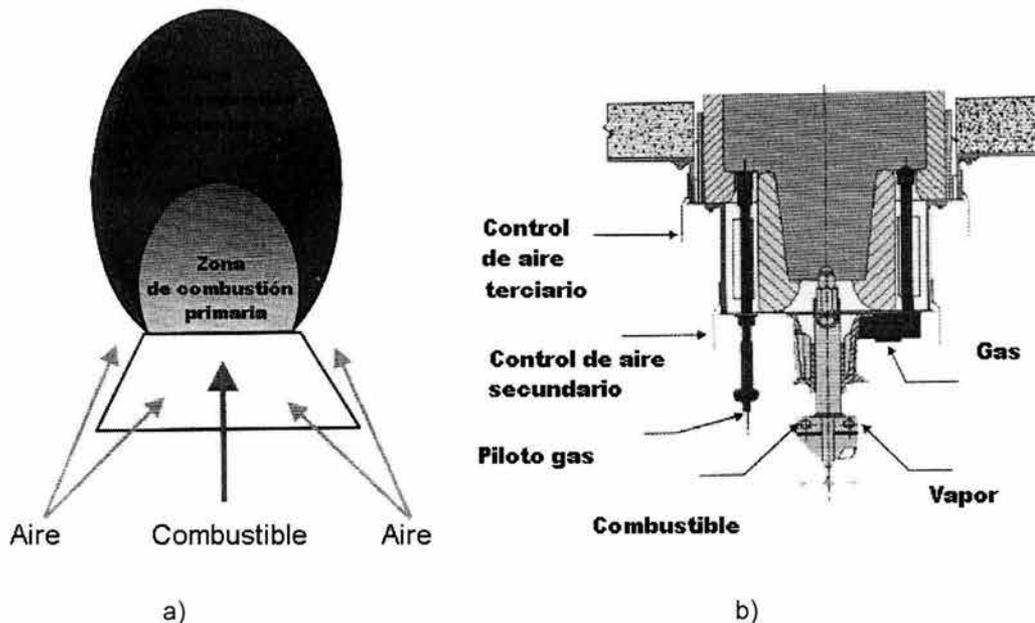


Fig. 3.28

- a) Desarrollo de la flama en un quemador por pasos
- b) Quemador con atomización de combustible por medio de vapor

4) Quemadores de pulverización mixta (mecánica y fluido de arrastre).

Como su nombre indica, combinan ambos sistemas, lo que le confiere gran velocidad y gran flexibilidad, manteniendo ángulos de pulverización constantes. Trabajan con presiones de aceite de 10 a 200 kPa y consumos de fluido de arrastre del orden de 0.05 kg por kg de combustible. Una variante de este tipo de quemadores es el dual, en el que el gas es fijo y la regulación se realiza con Diesel.

4.1) Forma de la flama.

Como en el caso de los quemadores de gas, la forma de la flama viene determinada principalmente por la presión de la mezcla, la proporción de aire primario y la calidad del mezclado. Así, en general:

- La flama se hace mas larga y estrecha al aumentar la presión.
- La flama se acorta si aumenta la aireación primaria.
- Un buen mezclado y la turbulencia acorta y concentra la flama.

4.1) Estabilidad.

También son aplicables los mismos conceptos generales ya señalados por lo quemadores de gas. En los quemadores de Diesel tiene importancia el control de desprendimiento de flama, lo que se logra principalmente:

- Utilizando grandes velocidades de aire e imprimiéndole circulaciones giratorias.
- Provocando fuertes recirculaciones, forzadas o inducidas por los gases quemados, con lo que se consigue aportar calor suplementario a la base de las flamas.
- Utilizando aire precalentado.
- Forzando turbulencias en las mezclas.

Un último método, actualmente en vías de desarrollo utiliza técnicas de ultrasonido.

3.4.2.3 Por el modo de regulación del gasto del combustible

Estos quemadores poseen un modo de regulación automático del gasto de combustible, es decir, una forma de regulación en la cual el gasto de combustible se modifica automáticamente por medio de aparatos que reciben los impulsos de funcionamiento a partir de dispositivos detectores de las variaciones de temperatura o de presión del elemento controlado.

Regulación automática «todo o nada». Es el caso particular de regulación automática en la cual el quemador funciona alternativamente con parada total o con funcionamiento a gasto constante.

Regulación automática «todo o poco». Es el caso particular de regulación automática en el cual sólo existen dos capacidades de gasto, máximo y mínimo.

Regulación automática «progresiva por escalas». Es el caso particular de regulación automática en la cual los órganos de regulación del gasto de combustible pueden establecer un cierto número de posiciones intermedias, entre las posiciones extremas correspondientes al mínimo y al máximo de gasto.

Regulación automática «progresiva continua». Es el caso particular de regulación automática en la cual los órganos de regulación del gasto de combustible pueden estabilizarse en cualquier posición comprendida entre las posiciones extremas correspondientes al mínimo o al máximo de gasto.

3.4.2.4 *Por el modo de encendido*

Los quemadores considerados en este sub tema tienen un modo de encendido en el cual la inflamación del combustible se provoca automáticamente por un dispositivo especial que puede ser eléctrico o mediante otros combustibles líquidos o gaseosos.

Encendido automático eléctrico. En este modo de encendido, la inflamación del combustible se provoca por el empleo exclusivo de energía eléctrica, este encendido puede ser permanente o intermitente.

Tiempo de encendido. Las diferentes secuencias de encendido son: Pre-encendido, encendido propiamente dicho y post-encendido, que forman el total del tiempo de encendido.

Pre-encendido: Es el intervalo de tiempo comprendido entre el momento de puesta en marcha del dispositivo del encendido eléctrico y el momento de liberación del combustible del quemador.

Encendido propiamente dicho: Es el intervalo de tiempo comprendido entre la liberación del combustible por el quemador y la aparición de una señal de flama dada por el dispositivo de detección de flama.

Post-encendido: Es el intervalo de tiempo comprendido entre la aparición de una señal de flama dada por el dispositivo de detección de flama y la parada del dispositivo de encendido eléctrico.

En el caso de encendido automático eléctrico permanente el tiempo de encendido corresponde al tiempo de funcionamiento del quemador.

Encendido automático por combustibles líquidos o gaseosos.

En este modo de encendido, la ignición del combustible se asegura. Por un pequeño quemador de combustible líquido o gaseoso llamado piloto; los quemadores piloto pueden ser permanentes o intermitentes. En el caso de un piloto permanente, su puesta en funcionamiento puede ser realizada manualmente en la primera puesta en marcha del quemador. Cuando se utiliza un piloto intermitente, su puesta en funcionamiento se realiza de manera automática por medio de un dispositivo especial, generalmente eléctrico.

3.4.3 Quemadores Especiales

Quemadores duales: gas / Diesel

En general se basan en un quemador de Diesel al que solo se le acopla un colector de gas que conduce éste a la vena del aire.

Quemadores para aire precalentado.

Si el aire no pasa de los 200 °C no se requiere generalmente precauciones especiales; pero por encima de estas temperaturas deberá prestarse atención a los refractarios y partes internas del quemador.

Quemadores con control de forma de flama.

La forma de flama la ajustan variando la velocidad de mezclado, pasando de flamas largas y estrechas (velocidad baja) a cortas y anchas (velocidad alta). También puede lograrse el mismo efecto variando la posición de las aletas del difusor de aire.

Quemadores de residuos líquidos.

Generalmente se usa uno de tipo dual, alimentando el residuo por la boquilla del combustible líquido. Se debe asegurar que el residuo sea combustible, que sea atomizable, que los productos no sean tóxicos ni corrosivos.

Quemadores con enriquecimiento de oxígeno.

En ellos el oxígeno se mezcla con el aire, nunca con el combustible y se debe tener precaución de que por ninguna circunstancia el oxígeno pueda fugarse a la canalización de aire o a la del combustible.

3.4.4 Tratamiento Previo del Combustible.

Por razones obvias, el diesel debe filtrarse para evitar problemas en las boquillas y precalentarse para su transporte y pulverización.

- a) La filtración tiene lugar en general, en dos etapas. Una a baja temperatura, aproximadamente a 45 °C, para la protección de las bombas, otra a alta temperatura, aproximadamente a 100 °C, para la protección del quemador. La limpieza del filtro es una operación intermitente, por lo que deberá preverse una doble línea en paralelo en sistemas de combustión continuos.
- b) El almacenamiento de gasoleo se realiza a temperatura ambiente; el del Diesel deberá ser de 40 a 50 °C, necesario para la circulación. En este caso, las tuberías se calientan con vapor o eléctricamente.

3.5 QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Aunque el carbón contiene materiales volátiles que al mezclarse con el aire dan lugar a la flama, la mayor parte de su materia combustible es sólida y a ella tiene que llegar el oxígeno para que tenga lugar la reacción de combustión. Esta etapa de difusión es la más lenta por lo que debe activarse aumentando el contacto sólido – aire, lo que implica reducir el tamaño del carbón.

Los sistemas utilizados para realizar el contacto aire-carbón son:

- Quemadores de carbón pulverizado.
- Cámaras de combustión tipo ciclón.
- Parillas.
- Cámaras de combustión de lecho fluidizado.

3.5.1 Quemadores de Carbón Pulverizado

El carbón debe secarse y pulverizarse a tamaños que dependan de la clase de carbón, (así la hulla se pulveriza de modo que el 80 % sea inferior a 0.1 mm; el lignito, el 60% es inferior a 0.1 mm), y se transporta neumáticamente al quemador, de modo que el aporte de aire suele representar del 20 al 40 % del aire de combustión, según sea el contenido de humedad y cenizas.

El quemador es similar al usado para combustibles líquidos; pero debido a que el tiempo de combustión es más largo, se dan velocidades de salida más bajas, que llegan incluso a los 5-10 m/s. Se pueden construir con potencias de hasta 46 MW.

Debe tenerse especial cuidado con las temperaturas: en la entrada, para asegurar la estabilidad, no se puede bajar de los 55 °C y no se puede sobrepasar la temperatura de coquización, que es de 70 °C si el contenido en volátiles es mayor que el 25%, por ejemplo. Pero también en la cámara de combustión pueden aparecer problemas en la formación de cenizas (óxidos de silicio, aluminio, calcio, etc.)

3.5.2 Cámaras de Combustión Tipo Ciclón.

La combustión tiene lugar a elevadas temperaturas en una cámara recubierta de escoria fundida, que tiene la función de aislante, evita pérdidas de calor y asegura temperaturas elevadas.

El carbón pulverizado entra en contacto con el aire primario tangencialmente y, de modo independiente, también se alimenta el aire secundario. Las partículas mayores de carbón tienden hacia la pared, donde son captadas, mientras que las finas, arrastradas por el aire, son quemadas completamente. Se consiguen potencias por unidad de volumen de cámara de hasta 9 MW/m^3 .

3.5.3 Lechos Fluidizados

En la combustión con lecho fluidizado se dispersa y quema cualquier combustible, por ejemplo, carbón, aceites o gas, en un lecho fluidizado de partículas inertes. En la mayoría de las aplicaciones la temperatura del lecho se mantiene en el rango de $750\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, de forma que la combustión queda sustancialmente completada, pero se evita la incrustación o apelmazamiento de las partículas. Los productos gaseosos de combustión dejan el lecho a la temperatura de operación, llevándose alrededor del 50% del calor generado. El resto del calor producido se aprovecha por transmisión directa a las superficies de transferencia de calor sumergidas dentro del lecho: para las aplicaciones en calderas se introduce una bancada de tubos de vapor. La transferencia de calor en las superficies sumergidas es uniformemente alta en comparación con la variación de transferencia de calor radiante a través de una cámara de combustión convencional. Por consiguiente, se requiere menor superficie de transferencia para una producción determinada y el sistema de caldera ocupa un volumen más pequeño. La baja temperatura de combustión reduce la corrosión y el ensuciamiento, permite una menor emisión de óxidos de nitrógeno y álcalis logrando un mejor control de la emisión de óxidos de azufre por adición directa de dolomita o cal al lecho fluidizado.

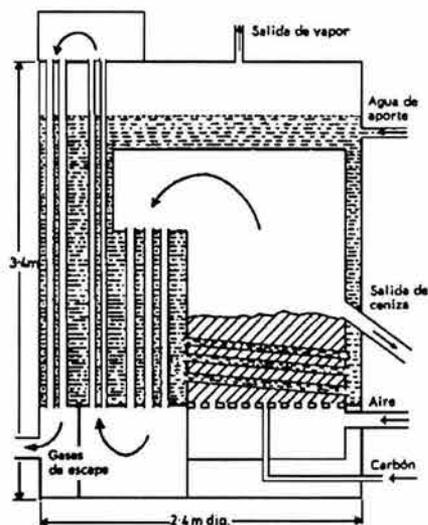


FIG. 3.29 Calderas de carcasa vertical

3.5.3.1 Características de la combustión fluidizada.

Propiedades de los lechos fluidizados

En la combustión fluidizada, el combustible se quema en un lecho fluidizado de material mineral, por ejemplo cenizas de carbón, arenas de sílice o caliza para la retención de azufre. El paso del aire necesario para la combustión a través del lecho mantiene las partículas en

un estado de violenta fluidización. La turbulencia en un lecho fluidizado es una forma ideal de combustión debido a la gran velocidad de transferencia de masa y calor; el aire de fluidización es calentado por el lecho a los pocos milímetros de la entrada; las velocidades de transferencia de calor por convección a las superficies sumergidas de una caldera son muy altas. La pérdida de presión a través del lecho es la que se requiere para soportar el peso de las partículas; un valor común es 10 Pa (1 mm de agua) por milímetro de profundidad de lecho.

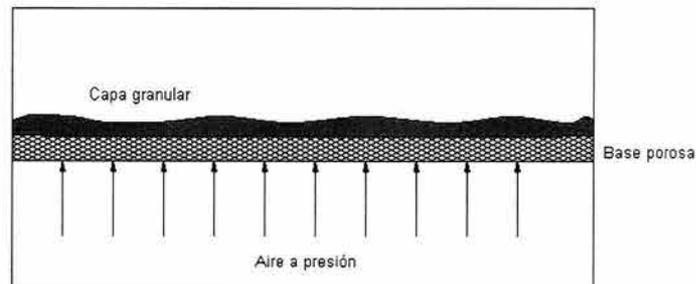


Fig. 3.30

3.5.3.2 Combustión en lechos fluidizados.

Factores relevantes

La cantidad de combustible que puede quemarse en un lecho fluidizado viene determinada por la velocidad de suministro de aire y, por supuesto, por la velocidad de fluidización y presión de operación. Se utilizan velocidades de 0.3 a 4 m/s, medidos a la temperatura del lecho, produciendo una cantidad de calor variable de 0.2 a 3 MW/m² por área de lecho a presión atmosférica. El rendimiento de la combustión queda determinado por muchos factores de operación, incluyendo tipo de combustible, exceso de aire, temperatura del lecho, velocidad de fluidización, altura del lecho y uniformidad en la distribución de combustible. El desprendimiento de calor por unidad de volumen (lecho más zona libre) es de 2 MW/m³ (presión de 5 a 8 Pa) para el carbón.

Combustión de carbón

Ha existido y existe una gran cantidad de investigación sobre calderas para centrales térmicas con producción de electricidad por combustión de carbón. La ceniza del carbón se utiliza como material de soporte del lecho y, puesto que las cenizas pueden ser tan largas como la pieza más grande de carbón, el mineral se muele hasta el tamaño apropiado para una determinada velocidad de fluidización. Los tamaños más comunes para el carbón son de 1.6 mm, tamaño máximo para 0.5 m/s, a 6.4 mm para 4 m/s. El lecho se opera normalmente entre 750 y 950 °C. Las temperaturas más bajas se utilizan con baja carga; pero dan poco rendimiento de combustión. Existe peligro de apelmazamiento de la ceniza por encima de 950 °C, debido a que las partículas de carbón pueden tener una temperatura 100 °C por encima de la del lecho. Suponiendo que la distribución de carbón es uniforme en el lecho, las sustancias volátiles y el monóxido de carbono producido se queman, en su mayoría, dentro del lecho y su combustión queda completada a menos de 1 m por encima de la superficie del lecho. Para sostener la combustión es necesario menos del 1% del carbón contenido en el lecho. El carbón alimentado contiene una proporción de carbón muy dividido, existiendo, por tanto, inevitables pérdidas (debidas al arrastre provocado por el gas de fluidización) de finas partículas sin quemar. A fin de evitarlo, el carbón se inyecta neumáticamente, la mayoría de las veces cerca del fondo del lecho a unos 0.5 m y preferiblemente a mayor profundidad. Por este motivo se pone un panel de 2 a 4 m de altura por encima del lecho. Si la pérdida de

combustible debida al arrastre es inaceptablemente alta puede reducirse volviendo a quemar las partículas en el lecho principal o alimentándolas a un lecho separado. Los materiales finos se separan fácilmente del gas mediante ciclones (son considerablemente más gruesos que las partículas de ceniza emitidas por un quemador). El método más simple para quemar las partículas más pequeñas es utilizar el propio lecho, pero pueden requerirse que pasen muchas veces a través del lecho para alcanzar un alto rendimiento en la combustión, particularmente a grandes velocidades de fluidización.

Una gran velocidad de reciclado de la ceniza puede conducir a un buen rendimiento, y si la ceniza se enfría después de su salida, se elimina una gran cantidad de calor del lecho.

En un método reciente de aplicación industrial para la combustión de carbón se utilizan tamaños de 50 mm y superiores. Ha sido desarrollado en el Reino Unido por la National Coal Board's Coal Research Establishment. Utiliza una propiedad similar a los fluidos, por la que un lecho de gran densidad puede mantener en flotación partículas relativamente grandes y más densas. Las velocidades de fluidización están en el rango usual de 0.3 a 4 m/s. El método es particularmente apropiado para carbones grasos. En la combustión con lecho fluidizado este tipo de carbón produce generalmente una ceniza que puede ser considerada como un fino, siendo, por tanto, fácilmente arrastrada del lecho refractario. El uso de carbón sin moler reduce los arrastres de las finas partículas de carbón sin quemar y permite reducir tanto la altura del lecho como la altura total del equipo.

Combustión de aceites

El interés de la combustión de los aceites en lechos fluidizados se debe a su capacidad de quemado para todo tipo de combustibles, desde Diesel y gasoleo a residuos de vacío y a la reducción en la emisión de azufre provocada por adición de caliza. Debido a que la volatilización del combustible ocurre rápidamente, el sistema distribuidor para el aire y combustible es más complicado que el del carbón. Con un sistema apropiado, pueden quemarse eficientemente en un lecho de partículas de refractario hasta combustibles pesados.

Combustión de gas

El interés en la combustión de gas se debe a las altas características de transferencia de calor en los lechos fluidizados, comparándolas con la radiación procedente de una flama. Como en el quemador de aceite, existe poca mezcla lateral del gas en el lecho, de modo que es esencial una distribución uniforme en la superficie del lecho. Esta se consigue más fácilmente que el caso anterior mezclando el gas con el aire de fluidización al la cámara por debajo del distribuidor. Este debe diseñarse para prevenir cualquier posibilidad de combustión antes del distribuidor en plena cámara de distribución. Con este tipo de mezcla, la combustión en el lecho es extremadamente intensa. La combustión completa puede alcanzarse con bajos niveles de exceso de aire en lechos de refractario de solamente 50 mm de profundidad, o menores, y velocidades de fluidización similares o excediendo a las de una flama normal.

Combustión de materiales residuales

Los lechos fluidizados pueden utilizarse para incineración de materiales de desecho, con o sin recuperación de calor; por ejemplo, lodos procedentes de refineries y preparación de carbón, basuras municipales y lodos procedentes de tratamiento de aguas negras. El requisito principal es la producción de un sólido inerte para su posterior desecho. Debido a sus fines, no es esencial un alto rendimiento. Los fangos acuosos se dispersan sobre la superficie del lecho a fin de obtener alguna evaporación y reducir el riesgo de adherencia de partículas en el lecho.

3.5.3.3 Consideraciones en el diseño y operación

Selección de la velocidad de fluidización

La velocidad de fluidización es el factor de diseño más importante y debe ser optimizado. La operación con baja velocidad produce una buena transferencia de calor, buen rendimiento en la combustión y gran retención de azufre, pero necesita una gran área de lecho. Con alta velocidad se reduce el área así como la eficiencia de la combustión y la retención de azufre. Cuando los lechos son más profundos, el área de transferencia de calor debe introducirse en una superficie de lechos más pequeña, siendo necesaria mayor superficie de transmisión de calor debido a menores velocidades de transferencia.

Puesta en marcha

La combustión del carbón comienza a unos 500 °C en un lecho fluidizado; los aceites lo hacen a unos 650 °C. En la puesta en marcha, el lecho completo o el compartimiento de arranque deben calentarse a la temperatura apropiada antes de la alimentación del combustible. El método más simple consiste en dirigir a su superficie una flama de gran intensidad mientras el lecho está fluidizado. Es importante fluidizar el lecho con la mínima cantidad de aire con el fin de evitar pérdidas.

Una alternativa, particularmente conveniente para lechos con combustión de gas, es fluidizar en frío con una mezcla aire/gas. Inicialmente, la combustión del gas se produce en la parte superior del lecho, desplazándose gradualmente cuando se alcanza una temperatura de 600 °C. Con partículas grandes, el aire frío necesario para la fluidización puede producir una velocidad de gases salientes en la parte superior del lecho que exceda a la velocidad de la flama. En esta situación, bien se utiliza un método alternativo con las partículas pequeñas, o se ajusta el suministro aceite/gas de forma que el lecho quede estático y pueda fluir al momento que la temperatura sea la adecuada. Cuando la combustión del gas se produce sobre el lecho estático, la fluidización progresa en profundidad a medida que aumenta el calor.

En algunas plantas experimentales el arranque se efectúa con la fluidización por aire caliente. Este método no es comercial debido a la complicación en el diseño del distribuidor de aire.

Control y disminución de producción

A fin de alcanzar buenos rendimientos en la combustión y en la retención de azufre, es preferible mantener la temperatura en el rango de 750-795 °C. Para las aplicaciones en las que el lecho contiene superficies fijas de transferencia de calor, particularmente calderas, únicamente puede reducirse la velocidad de transferencia disminuyendo la temperatura del lecho. (El coeficiente de transmisión de calor es independiente de la velocidad de fluidización). Dependiendo de la temperatura máxima de operación, la salida de una caldera de combustión fluidizada puede únicamente reducirse en un 70 u 80% de la carga total antes de que la temperatura llegue a ser demasiado alta para soportar la combustión y las velocidades de alimentación del combustible y el aire hayan sido reducidas. A fin de alcanzar la relación de descenso de 5:1 o más, requerida en algunas calderas, es necesario reducir el área de la superficie de transferencia de calor durante la operación. Existen dos métodos para conseguirlo. El primero es dividir el lecho en compartimientos y fluidizar el número apropiado para la carga deseada. El segundo es reducir el área efectiva al mismo tiempo que se reduce la carga. Esto se consigue automáticamente, puesto que los tubos próximos a la superficie del lecho quedan progresivamente descubiertos al contraerse el lecho por el descenso de la velocidad de fluidización. Alternativamente, sobre todo en lechos profundos de combustión a presión, su profundidad puede controlarse retirando o reemplazando material del lecho.

Los combustores sin superficies de transferencia de calor, por ejemplo, incineradores de gases calientes, se operan generalmente con un exceso de aire para eliminar el calor generado en el lecho. Este exceso se utiliza para controlar la temperatura del lecho. La única restricción en los descensos de producción es mantenimiento la fluidización en el lecho.

Aplicaciones de la combustión fluidizada Generación de potencia

La mayoría de la investigación y desarrollo en la combustión fluidizada ha sido dirigida para su uso en la generación de electricidad. Esta investigación se ha completado con diseños y estudios de costos, la mayoría de ellos con varios lechos separados a fin de poder controlar mejor la producción. Por ejemplo, el diseño de una planta de 660 MW con una turbina mixta gas/vapor, preparado por Westinghouse Electric Corporation para la U. S. Environmental Protection Agency, consta de cuatro recipientes verticales a presión, conteniendo cada uno cuatro lechos, según muestra la figura No 3.31

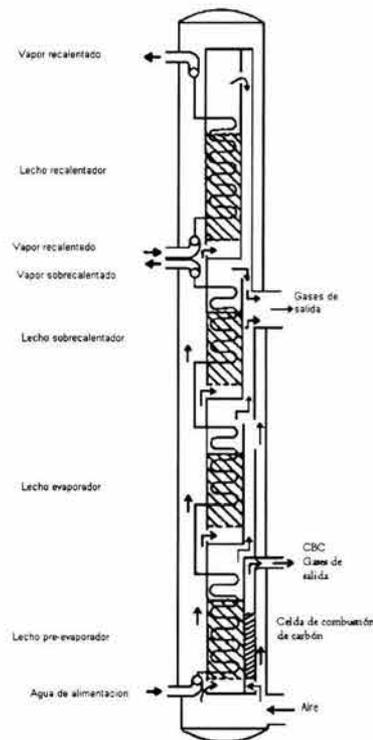


Fig 3.31. Combustor presurizado desarrollado por Westinghouse.

Los estudios realizados indican que un combustor a presión atmosférica con un ciclo convencional de vapor produce un ahorro del 10% en la inversión total comparado con el costo de una planta de generación convencional, válido para tamaños de 140 y 660 MW. Para un combustor a presión con una turbina de ciclo de vapor con mezcla y ciclo de gas abierto, con la compresión de aire incluida en la turbina y produciendo alrededor del 25 % de la potencia, los estudios indican ligeros incrementos en las inversiones para 140 MW y ahorros de un 20% en el costo de la caldera y del 10 al 14% en el costo de generación de potencia a 660 MW. También se han considerado turbinas con ciclos complejos, particularmente para lugares con limitados recursos de agua de refrigeración.

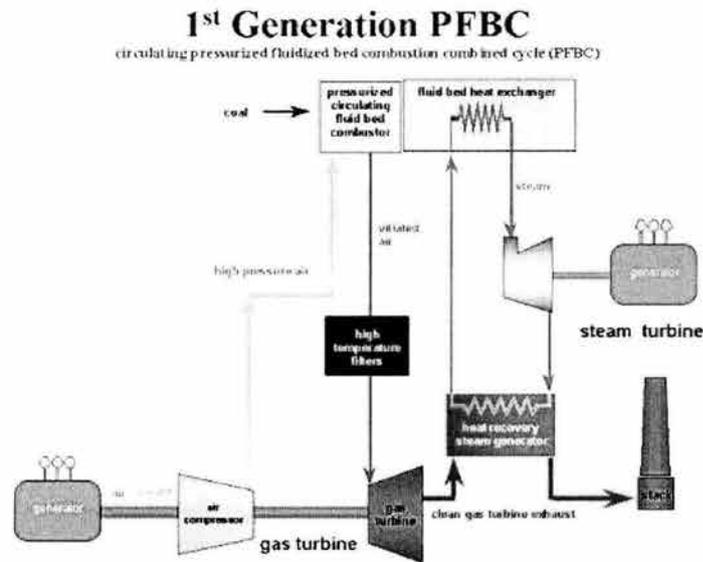
La tecnología de combustión de lechos fluidizados FBC (fluidized-bed combustión), ofrece una opción viable de la generación de energía. Las unidades comerciales de FBC funcionan en condiciones competitivas en comparación con los ciclos de potencia tradicionales, y su costo de instalación es menor, produciendo menos cantidad partículas de NO_x y SO_2 .

Dentro de los sistemas de lechos fluidizados para generación de potencia se encuentran esencialmente dos grupos importantes:

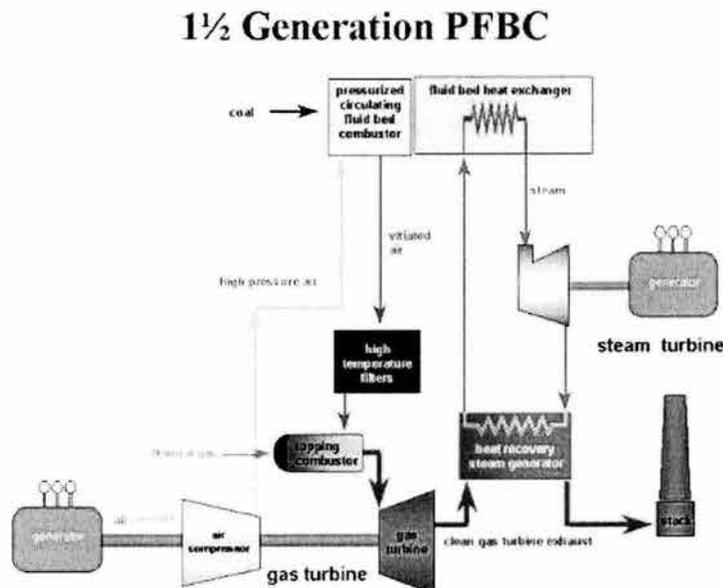
1. Sistemas atmosféricos FBC
2. Sistemas presurizados PFBC (pressurized fluidized-bed combustión)

Existen otros dos grupos de lechos fluidizados de menor importancia: como el de burbujeo y circular.

Lechos fluidizados atmosféricos. Estos sistemas utilizan un material mineral tal como piedra caliza o dolomita para capturar el sulfuro lanzado por la combustión del carbón. Los jets del aire suspenden la mezcla del material mineral y del carbón ardiente durante la combustión, convirtiendo la mezcla en una suspensión de las partículas candentes que fluyen como un líquido. Estas calderas funcionan a la presión atmosférica

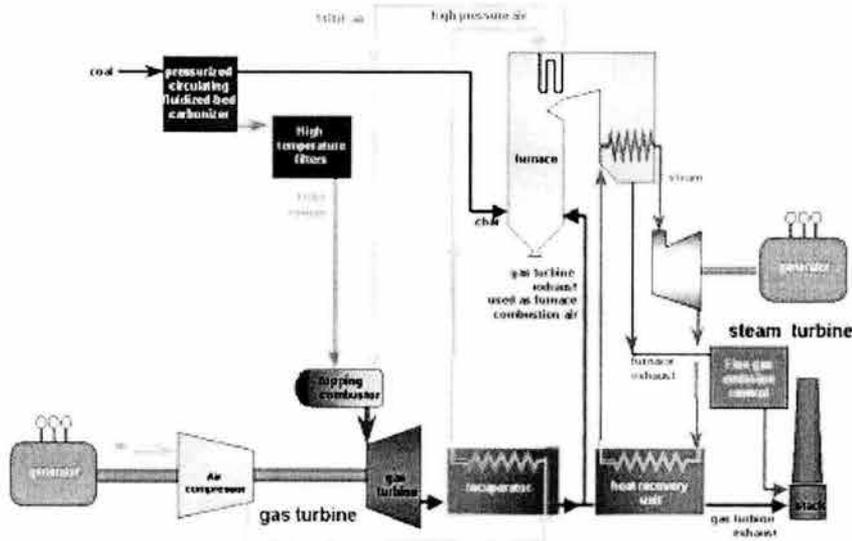


Lechos fluidizados presurizados PFBC. El sistema de primera generación de PFBC también utiliza un material mineral y los jets del aire para suspender la mezcla del mineral y del carbón ardiente durante la combustión. Sin embargo, estos sistemas funcionan a presiones elevadas y producen una corriente de gas con presión y temperatura altas, una parte de estos gases se extraen y pasan a través de un filtro y posteriormente a una turbina de gas. Gran parte de los gases de combustión del lecho fluidizado pasan a una caldera en la cual se produce vapor que pasa a través de una turbina, creando un ciclo combinado de alta eficiencia.



CHIPPS. Un sistema de CHIPPS es similar, pero en lugar de tener un combustor de lecho fluidizado atmosférico emplea un horno.

F-W Combustion High Performance Power System (CHIPPS)



3.5.4 Calderas Industriales

Sistema Ignifluid

Este sistema, desarrollado en Francia para el uso con calderas de tubos de agua, acepta el hecho de que un incremento en la cantidad de calor producido; por ejemplo, del conseguido con un hogar de soportes por cadenas, se obtiene únicamente aumentando la velocidad del aire que circula a través del lecho, hasta que las partículas llegan a estar suspendidas por encima de la malla de soporte, moviéndose y mezclándose en todo el volumen del lecho. Esta gran turbulencia provoca una gran reacción química, de aquí que el sistema Ignifluid se utilizó en principio para quemar antracita.

El principio de la combustión en la unidad Ignifluid se refleja en la figura 3.32

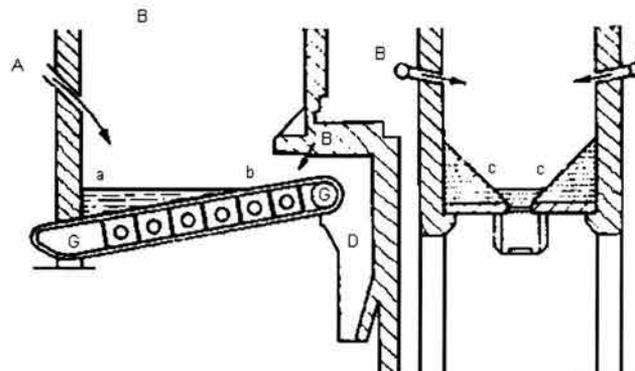


Fig. 32 Horno Ignifluid. A alimentación de carbón
 a-b superficie del lecho B aire secundario
 c paredes protectoras de combustible estático
 D tolva de escoria G-G hogar de cadenas con caja de viento compartida

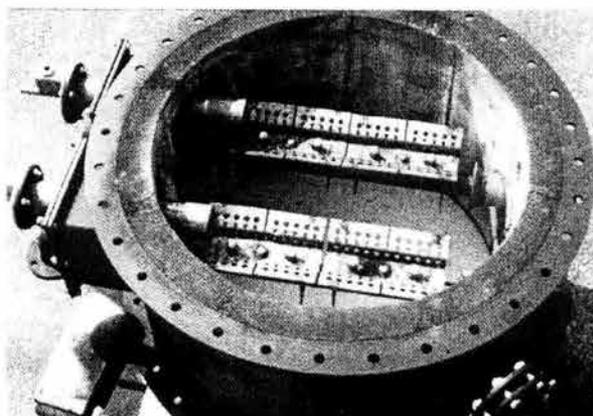
La región del lecho con paredes en pendiente provoca una velocidad decreciente en el lecho. La temperatura de combustión es tal que las partículas de ceniza y escoria se unen formando masas

que caen a una estrecha reja soporte colocada en la parte inferior del lecho. De aquí se transportan, mediante la misma reja, hasta el final del lecho por donde se encuentra el punto de descarga. Lo mismo que en un sistema de lecho fluidizado, el arrastre es muy grande: las pequeñas partículas en el lecho, bien alimentadas o formadas durante la combustión o por rotura de otras mayores, se arrastran por la velocidad del aire requerido para fluidizar las partículas mayores. Un sistema de reciclado de partículas es parte integral de este método.

Los combustibles más adecuados para el sistema Ignifluid son aquellos con tamaño de partícula de unos 13 mm y con baja capacidad de compactación. No es una desventaja un gran contenido de cenizas.

Se han hecho muchos desarrollos en este sistema y las aplicaciones a pequeñas calderas, de carcasa o tubos de agua, industriales, y ahora son ya de aplicación comercial. Con el fin de reducir el tamaño y el coste de la caldera, la intensidad de combustión de la unidad debe incrementarse y esto sólo puede conseguirse (excepto, al menos ahora, con aire enriquecido con oxígeno) aumentando la velocidad y gasto de aire en combustión en el lecho.

Las calderas industriales para calentamiento o producción de vapor, del tipo carcasa o tubos de agua, pueden operarse con combustión fluidizada. Las calderas de carcasa pueden ser verticales, como en la fig 3.29, u horizontales. La fluidización permite una reducción de tamaño para una capacidad dada. En la siguiente figura se muestra el ducto de un quemador de lecho fluidizado para un generador de vapor.



Ducto de un quemador de lecho fluidizado para un generador de vapor

Tratamientos de residuos

La facilidad de la combustión fluidizada para el quemado de todo tipo de combustibles la hace muy aplicable para procesos de incineración, con o sin recuperación de calor. En la actualidad existen plantas en operación para quemar lodos de plantas de tratamiento de aguas, basuras, residuos de refinería, etc., un ejemplo de ello es el sistema de lecho fluidizado circulatorio (CFBC) desarrollado por una empresa canadiense, Cintec-Tredi que ofrece sus servicios tecnológicos para mejorar el medio ambiente, dicho sistema permite la destrucción térmica de los contaminantes orgánicos, particularmente los bifenilos policlorados (BPCs) que se encuentran en suelos contaminados, desechos sólidos o líquidos y en lodos.

La unidad térmica de lecho fluidizado circulatorio está compuesta de los elementos siguientes:

- una cámara de combustión y un ciclón,
- sistema de enfriamiento del gas,
- filtro para atrapar el polvo,
- sistema de purificación con secador por inyección de cal hidratada,
- chimenea,

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

- ventilador para la evacuación del gas en la chimenea,
- sistema de control continuo,
- sistema computarizado de control y de registro de datos.

Los materiales ya sean sólidos o líquidos contaminados se introducen en la cámara de combustión del incinerador, la cual consiste inicialmente en una capa de arena precalentada. Una corriente de aire forzado se mantiene en el cauce para que aspire inmediatamente la materia introducida en la cámara de combustión. La gran turbulencia a la cual se someten los contaminantes en la cámara y la temperatura del horno (aprox. 950°C) permiten la destrucción de los componentes orgánicos, tales como los BPCs.

El sistema funciona las 24 horas del día. Los residuos del tratamiento son enviados a sitios de tratamiento autorizado. Los suelos tratados se pueden utilizar como material de relleno o para trabajos de ingeniería civil si el nivel de la contaminación residual lo permite.

3.5.5 Parillas

Se distinguen por la forma del combustible y así pueden ser:

- Parillas fijas con alimentación desde arriba.
- Parrilla móvil (banda transportadora), con transporte horizontal del combustible hacia la cámara de combustión.
- Parrilla fija con alimentación desde abajo.

En todos los casos el aire de combustión debe atravesar la parrilla, por lo que se consigue un equilibrio entre el transporte de calor desde la zona de reacción a la parrilla y de la entrega de calor de ésta al aire de combustión.

La potencia específica conseguida (por unidad de superficie de parrilla) es del orden de 1 a 1.7 MW/m², lo que corresponde a un consumo de 100 a 200 kg/h m² de carbón.

3.6 QUEMADORES TIPO PAQUETE

Los quemadores tipo paquete se caracterizan porque incluyen la mayor parte de los componentes necesarios para su operación, estos deben cumplir con las más rigurosas normas internacionales de seguridad, eficiencia y emisiones al ambiente; incluyendo componentes como válvulas, presostatos y programadores de secuencia. Además de contar con mayor equipo de seguridad, el quemador es de tipo cañón ya que está conformado como un paquete completamente ensamblado y listo para recibir energía eléctrica y combustible para su operación. Existen modelos que utilizan la mayoría de los combustibles fósiles, tales como:

- Gas LP o gas natural
- Diesel o gasóleo
- Combustóleo
- Biogas
- Duales (gas / Diesel, gas / combustóleo)

Los quemadores tipo paquete suelen tener los siguientes tipos de operación:

- On-Off.- Propios para uso donde la presión en la cámara de combustión no es significativa, ni las variantes de temperatura son tan estrictas.
- High-Low.- Aumentan la eficiencia del sistema de combustión al operar sin apagarse durante todo el ciclo del proceso, ahorrando combustible y mejorando las variantes de temperatura.
- High-Low-Progressive. Con una alza y disminución de la potencia térmica de forma progresiva, lo que permite vencer lentamente la contrapresión en la cámara de combustión y mejora aún más las variantes o picos de temperatura en el proceso.

- Modulante.- Para temperaturas muy precisas y para potencias y contrapresiones en la cámara de combustión mayores.

Aplicaciones:

Los quemadores de tipo cañón tienen múltiples aplicaciones en el campo doméstico, comercial o industrial, dependiendo del proceso y la capacidad, estos pueden ser usados en los siguientes sectores:

- Calderas (Tubos de Agua, Tubos de Humos)
- Calentadores (para agua o aceite diatérmico)
- Calefacción
- Secadores rotatorios
- Pintura
- Tinas de lavado y fosfatizado
- Pintura
- Textil
- Panadería
- Hornos
- Invernaderos
- Cereales
- Floricultura
- Cerámica
- Empaque
- Cartón y Papel
- Plantas de re-generación de calor
- Baldosas y Azulejos
- Asfalto y Cemento
- Química
- Servicios (Hospitales, Instalaciones Deportivas)
- Otros

Componentes principales.

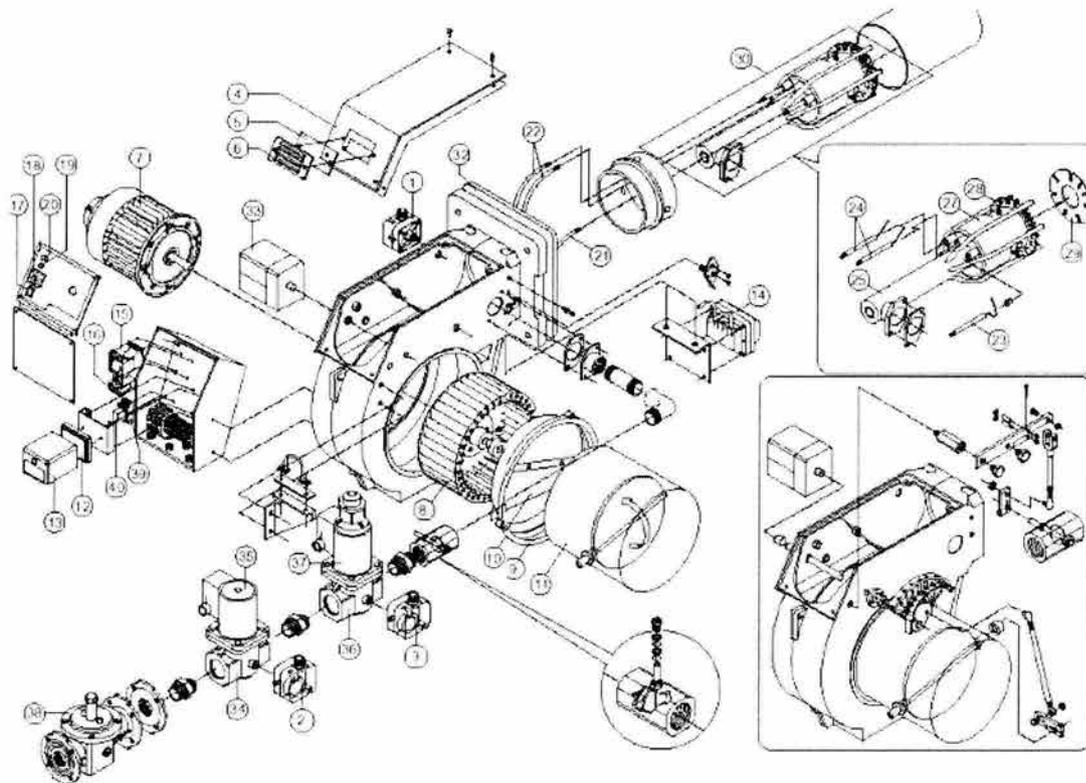
Los quemadores al ser de tipo paquete, incluyen ya todos los elementos necesarios de seguridad y para su puesta en marcha, incluyen principalmente:

- Cuerpo del quemador con fácil acceso a boquillas para mantenimiento
- Mirilla
- Marco y Junta de asbesto para su fijación al aparato
- Ventilador y motor
- Electrodo, Cables y Transformador de Ignición
- Programador de secuencia de encendido y seguridad contra falla de flama
- Regulación de mezcla aire/gas automático o manual.
- Sistema de retención de flama con disco difusor.
- Caja de conexiones o Tablero de control montado en el cuerpo del quemador.
- Silenciador en la toma de aire de combustión

En el caso de los quemadores de gas se incluye también:

- Presostato para aire de combustión
- Presostato para mínima presión de gas y para máxima presión
- Válvula de seguridad y regulación flujo y velocidad de apertura para gas

- Válvula de seguridad extra
- Válvula modulante para gas en modelos Progresivos y Modulantes
- Servomotor y varillajes, excepto modelos On-Off
- Electrodo de ionización para detección de flama



- | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 Control de presión de aire | 13 Caja de control | 26 Palanca |
| 2 Control de presión mínima de gas | 14 Transformador de encendido | 27 Cabezal de combustión |
| 3 Control de presión máxima de gas | 15 Interruptor de control remoto | 28 Disco posterior |
| 4 Cubierta | 16 Control térmico del motor | 29 Disco frontal |
| 5 Vidrio | 17 Interruptor principal | 30 Cabezal del quemador |
| 6 Mirilla | 18 Conmutador | 31 Ducto para flama |
| 7 Motor | 19 Lámpara | 32 Soporte |
| 8 Ventilador | 20 Fusible auxiliar | 33 Compuerta de aire del motor |
| 9 Junta del ventilador | 21 Cable de ionización | 34 Válvula de gas |
| 10 Alabes del ventilador | 22 Cable para encendido | 35 Solenoide |
| 11 Toma de aire | 23 Sonda de ionización | 36 Válvula de gas |
| 12 Base de la caja de control | 24 Electrodo de encendido | 37 Solenoide |
| | 25 Tubo | 38 Gobernador de gas |
| | | 39 Base del restablecedor |
| | | 40 Restablecedor |

En el caso de los quemadores de diesel o gasóleo se incluye también:

- Sistema hidráulico de regulación de mezcla en modelos de dos potencias de flama.
- Bomba de combustible.

- Válvula solenoide
- Fococelda
- Esprea(s)
- Filtro y Mangueras de alimentación y retorno.

En el caso de los quemadores de combustóleo se incluye también:

- Sistema hidráulico de regulación de mezcla
- Precalentador eléctrico de combustible
- Manómetro y Termómetro
- Resistencias eléctricas a lo largo de la línea de alimentación hasta las espreas
- Bomba de combustible
- Válvulas solenoides
- Fococelda
- Espreas
- Filtro y Mangueras de alimentación y retorno

3.7 Accesorios y sistemas de seguridad para el manejo de quemadores.

Es posible incorporar en todos los quemadores sistemas de control ya sea manual o automático; a este tipo de accesorios se les conoce como trenes de gas. Véase Anexo III.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe cada uno de los sistemas que componen la cámara de combustión C492 que se encuentra instalada en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Campus Ciudad Universitaria; así como los componentes que la forman. La descripción considera las características de funcionamiento, dibujos y especificaciones.

Se trata de una cámara de combustión didáctica marca Hilton modelo C492 la cual se compone de los siguientes elementos:

Cámara de combustión.

Un quemador tipo paquete para combustibles gaseosos.

Un quemador tipo paquete para combustibles líquidos.

Sistema de enfriamiento por agua.

Panel de control.

Sistemas de seguridad.

Instrumentación.

Chimenea.

Estructura de soporte.

4.2 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión constituye el espacio donde se produce la flama, se confina y se hace posible su observación visual; aislando y absorbiendo la energía calorífica liberada por la combustión mediante el agua de enfriamiento que circula por la camisa de agua. La camisa de agua es el espacio que se encuentra entre dos cilindros de lámina de acero inoxidable de 1.6 mm de espesor rolada y soldada, el interno que forma propiamente la cámara y tiene un diámetro aproximado de 450 mm y el externo, de mayor diámetro, de 500 mm que es la parte visible. En torno a ella se encuentran cuatro mirillas de vidrio de cuarzo, de 100 mm de diámetro, con las cuales se puede observar las condiciones y características de la combustión, así como de la flama el ancho, el color, la longitud, etc.

En la parte frontal interior se encuentra alojada la envoltura refractaria, de aproximadamente 80 mm de espesor, que es de aglomerado refractario, en la parte frontal exterior se encuentran colocadas dos tornillos roscados en las cuales se puede montar cualquiera de los dos quemadores tipo paquete.

La cara posterior de la cámara tiene un compartimiento en el que circula el agua de enfriamiento siendo la última sección del circuito de agua por el que pasa esta. El agua de enfriamiento entra por la parte baja frontal de la cámara (ver figura 4.1) y pasa al espacio formado por los dos cilindros (camisa) y enseguida sale por la cresta rectangular que se encuentra en la parte superior del cilindro, de ahí se dirige al compartimiento de la tapa posterior de la cámara, para después irse al drenaje.

También en la parte posterior de la cámara de combustión se encuentra colocado un codo de 90° que servirá de base para instalar la chimenea.

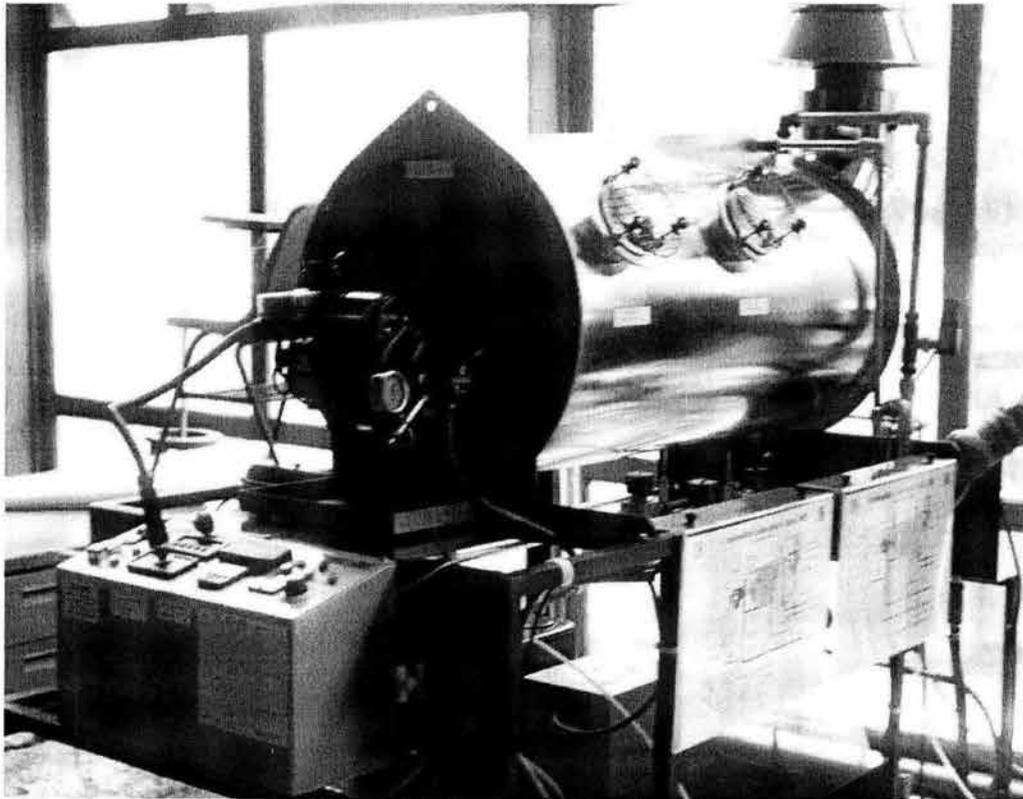


Figura 4.1 Cámara de Combustión

4.3 QUEMADOR TIPO PAQUETE PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los quemadores denominados tipo paquete son aquellos que tienen incorporados los dispositivos para verificar y controlar los suministros de aire, de combustible y las válvulas de control que regulan estos suministros, estos controles se agrupan a menudo junto con el ventilador, el sistema de ignición y la cabeza del quemador, dando como resultado un quemador tipo paquete automatizado; este tipo de quemador es el utilizado en la C492. Ver Figura 4.2

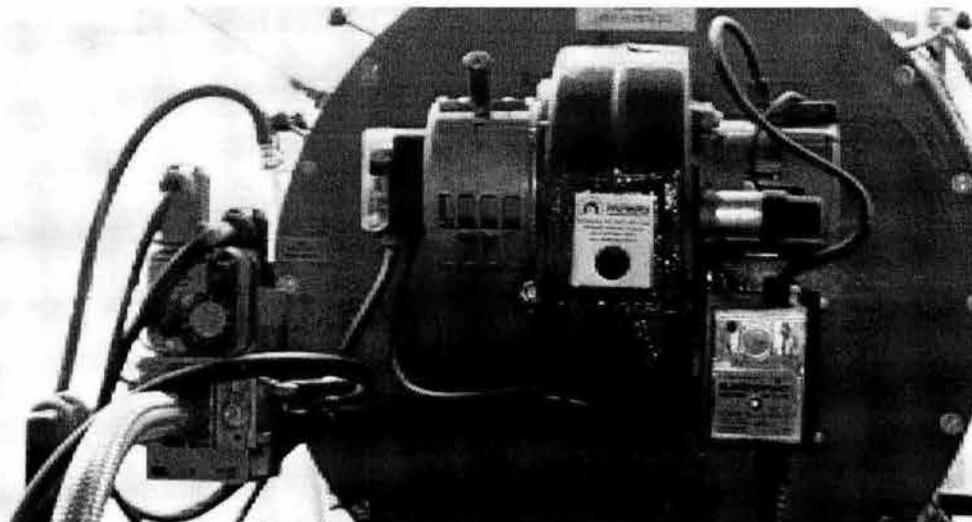


Figura 4.2 Quemador tipo paquete para combustibles gaseosos

El quemador para gas es del tipo paquete de la familia multigas, el cual es asistido por un ventilador, este suministra todo el aire que se requiere para la combustión, el ventilador se clasifica según su tamaño, el cual debe ser el adecuado para superar la resistencia del aire en el quemador y la cámara de combustión; el quemador puede ajustarse para quemar dos tipos de gas ya sea LP o Natural; esto se logra solo cambiando el tipo de boquillas y la presión de operación, este quemador contiene; caja de control, válvula multiblock y ventilador integrado. Consta de dos boquillas intercambiables para quemar gas natural (metano) o gas LP (Propano o Butano) con capacidad para suministrar aproximadamente hasta 117 kW de calor, y un electrodo para producir la flama mediante una chispa que posteriormente se apaga cuando la flama es auto sostenible.

El quemador de gas contiene de un dispositivo de "falla de flama", el cual cierra el suministro de gas al quemador a través de la caja de control en caso de falla de flama. Para el caso de quemadores asistidos por ventiladores los controles pueden variar según el fabricante y las regulaciones locales, pero comúnmente es una sonda de ionización como la utilizada en este quemador.

4.3.1 Sonda de ionización

Es un dispositivo que sirve para verificar si se está llevando a cabo la combustión en el quemador, y funciona bajo el principio de la detección de iones que se producen a causa de la reacción del combustible y el comburente cuando se lleva a cabo la combustión, si hay iones, el circuito se cierra, si no hay iones el circuito permanecerá abierto, lo cual indicara que no hay flama.

4.3.2 Caja de control

Está acoplada a un motor síncrono que mueve al ventilador desde donde se controla el inicio del ciclo y falla de flama que se puede detectar por la sonda de ionización. El flujo de aire es controlado por una compuerta (damper) en la succión del ventilador del quemador; los dos, el aire y la presión de gas, son censados continuamente por la caja de control y cuando cualquiera de los dos es insuficiente para garantizar el adecuado funcionamiento del quemador, este es apagado automáticamente. La caja de control incluye un disco pintado de diferentes colores, el cual indica la función del ciclo de arranque que se esta llevando acabo, también sirve para detectar la posible falla, según el color donde se detenga el disco, mediante un código de colores proporcionado por el fabricante; el código de colores es el siguiente:

COLOR	PROGRAMA DE INICIO	FUNCIÓN	TIPO DE FALLA	POSIBLE CAUSA
BLANCO	INICIA		NO INICIO	No hay suministro de aire, el interruptor puede estar en posición incorrecta
AZUL	VERIFICA EL SUMINISTRO DE AIRE Y POSTERIORMENTE SE LLEVA ACABO EL PRE-PURGADO	EMPIEZA A FUNCIONAR EL VENTILADOR	EL VENTILADOR NO INICIA	Interruptor de aire en mala posición y por lo tanto no hay suministro de aire
ANARANJADO	PRE ENCENDIDO	ENCENDIDO DE LA CHISPA OCASIONADA POR LA BUJIA	NO HAY CHISPA	Mala conexión de los cables en la bujía.
AMARILLO	TIEMPO DE SEGURIDAD TS1	EMPIEZA EL SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE	NO HAY FLAMA	Baja intensidad en la chispa No funciona la válvula solenoide
ROSA	FLAMA ADECUADA	SE ELEVA EL SUMINISTRO DE GAS	NO HAY FLAMA EDECUADA	Falla de flama
VERDE	INICIA EL FUNCIONAMIENTO		NO HAY FLAMA	Falla en el control de temperatura del agua de enfriamiento. Falla de flama durante el funcionamiento

Como se mencionó la caja de control, verifica el inicio del ciclo por lo que tiene programadas las siguientes secuencias de control:

- ✓ El temporizador realiza el cierre del interruptor principal del quemador y del ventilador; antes de la combustión se realiza el barrido de los gases para purgar y / o eliminar cualquier residuo de combustible no quemado. Se revisa el adecuado suministro de aire por medio de un interruptor de presión de aire (de diafragma).
- ✓ El controlador verifica la chispa - si la chispa es detectada la secuencia es completada.
- ✓ El programa realiza la ignición.
- ✓ El combustible es admitido, (el gas empieza ha ser admitido cuando se abre la válvula solenoide, cabe aclarar que válvula que debe estar funcionando es la que se encuentra sobre la línea de suministro de gas que deseamos quemar); la combustión debe comenzar.
- ✓ La caja de control verifica continuamente el sensor de flama, si la flama es detectada la secuencia esta completa, si no detecta la flama la ignición es interrumpida. Cualquier falla de flama cerrará el paso de combustible, deteniendo el ventilador, y esto causará que se apague el sistema, el cual requerirá de un restablecimiento manual.

4.3.3 Válvulas de control de suministro de gas y aire

Se encuentran principalmente dos tipos de válvulas de control para el quemador de gas.

4.3.3.1 Válvula solenoide

Esta válvula opera automáticamente, y es controlada por la caja de control, su función es de abrir o cerrar el suministro de gas del quemador, cada que la caja de control lo mande, esta válvula se encuentra colocada casi al inicio de la tubería de suministro de cada gas. La válvula solenoide funciona haciendo pasar una pequeña corriente a través de una bobina, en la cual se crea un campo magnético que levanta una compuerta dejando pasar el gas; cuando se requiere que ésta se cierre, el suministro de la corriente es interrumpido lo que ocasiona que el campo magnético sea eliminado dejando caer la compuerta.

4.3.3.2 Válvula multiblock

Esta fabricada mediante el proceso de fundición, y mide aproximadamente 20 cm de largo por 10 cm de ancho, es de forma rectangular de color plateado, y sirve para controlar la presión de entrada de los diferentes gases al quemador. Para el gas natural ajustamos el rango de presión girando el tornillo milimétrico que se encuentra en la parte superior de la válvula multiblock, éste está cubierto por una pequeña tapa movable de plástico de color negro. La válvula multiblock también cuenta con un tornillo de ajuste de presión para gas LP, el cual no es necesario moverlo ya que de fábrica viene ajustado a la presión requerida por el quemador, y éste también se encuentra en la parte superior de la válvula multiblock debajo de una tapa de plástico color negra roscada.

4.3.4 Compuerta de control para suministro de aire (damper)

Esta compuerta esta construida de lámina y se opera manualmente, se encuentra colocada en un costado del quemador, y esta graduada para controlar la cantidad de aire que requiere la combustión.

4.3.5 Boquillas del quemador

Se cuentan con dos boquillas para quemar gas natural y gas LP; la boquilla deberá ser la correcta para el tipo de gas que se desea quemar ya sea natural (metano) o gas LP. Las boquillas del quemador de gas se pueden identificar rápidamente. La boquilla para el gas natural (Figura 4.3) tiene el difusor de acero colocado fuera de la sección de la boquilla y tiene los agujeros más grandes, mientras la boquilla para el gas LP (Figura 4.4) tiene el difusor unido a la sección de la boquilla y los agujeros del gas son más pequeños.

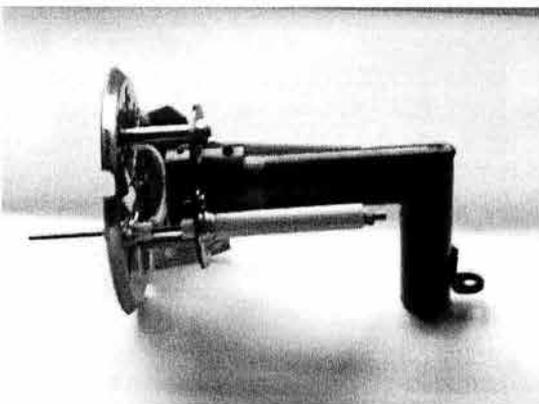


Figura 4.3 Boquilla para gas Natural

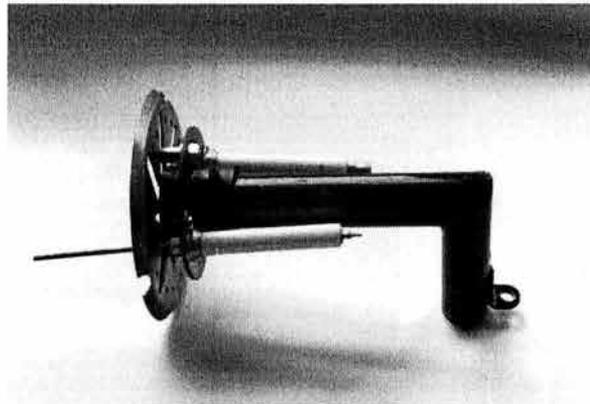


Figura 4.4 Boquilla para gas LP

4.3.6 Suministro de combustible (gas)

Las tuberías de suministro de gas natural y gas LP comienzan en la parte posterior de la estructura de soporte que sostiene a la cámara de combustión, cada uno es suministrado por diferentes tuberías que después de las válvulas solenoides se conectan a una línea común. La línea de suministro de gas natural tiene instalada una válvula de esfera de cierre rápido, esta línea alimenta a la cámara de combustión (el gas natural debe entrar a una presión menor a 5 kPa) posteriormente se encuentra una válvula solenoide, esta válvula tiene la función de cerrar el suministro de gas cuando la caja de control lo ordena, en caso de falla de flama. El gas LP se suministra a través de una tubería de menor diámetro (1/4 plg) por medio de una válvula de esfera de cierre rápido; esta válvula, está sobre la línea principal de gas LP hacia la cámara de combustión; posteriormente, se encuentra un regulador de baja presión, este sirve para garantizar que la presión de entrada del gas LP será menor de 200 kPa, a continuación se encuentra una válvula solenoide como sistema de seguridad. Solo puede usarse uno u otro gas en un determinado momento, esto depende de qué boquilla esté instalada el quemador, y a qué válvula solenoide esté conectado el tapón que proporciona la energía eléctrica, esto es como sistema de seguridad y así poder garantizar que sólo se esta usando el gas adecuado para la boquilla que tiene colocada el quemador. Las dos líneas de gas se juntan luego en una misma y pasan por el medidor de flujo de gas, el cual es de desplazamiento positivo, para que sea posible manejar las diferentes composiciones de gases sin necesidad de un factor de corrección. Se mide el tiempo en un dial pequeño producido por una revolución del medidor de flujo, siendo igual a 0.0283 m^3 (1 ft^3). Un paso produce un pulso en el temporizador de gasto de flujo para medir tiempo por revolución desde el cual es determinado el gasto volumétrico del flujo de gas, el temporizador se encuentra en el panel de control.

En seguida se encuentra una válvula de esfera de cierre rápido que se localiza en el lado izquierdo del tablero de control. El gas entonces atraviesa una longitud corta de tubería en la válvula multiblock. Aquí la presión del gas y el flujo se controla para dar el gasto requerido por el quemador, y por lo tanto el calor de entrada. Puede medirse la presión de entrada y salida del gas con un manómetro diferencial de agua en los puntos indicados para este fin en la válvula multiblock. El gas entonces entra en la boquilla del quemador para producir la flama.

4.3.7 Suministro de aire

El suministro de aire se lleva acabo por medio de un ventilador que esta acoplado a un motor síncrono el cual es controlado a través de la caja de control, el suministro de aire se lleva acabo desde el momento en que empieza a funcionar el motor síncrono, el gasto de aire se controla a través de una compuerta (damper) que se opera manualmente, esta compuerta esta graduada de 0 a 10 para dejar pasar diferentes gastos de aire y así poder garantizar que habrá la cantidad de aire necesario para llevar a cabo la combustión, por otra parte el sistema de control de presión de aire esta acoplado a la caja de control y lo censa continuamente.

4.4 QUEMADOR TIPO PAQUETE PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Es de la familia de quemadores de atomización por presión, de construcción y operación comparativamente sencilla. El sistema de atomización a presión consiste en que el combustible líquido es forzado desde una bomba de alta presión, a pasar por una boquilla, dentro de un conducto de aire tubular. Una fuerza rotatoria producida por la bomba distribuye al combustible dentro de la boquilla, lo que ocasiona que se generen pequeñas gotas saliendo de la boquilla en forma de un rocío cónico. El ventilador de aire y la bomba de combustible son coaxiales e impulsados por un motor eléctrico. Un electrodo causa la ignición y se apaga después de que la flama es auto sostenible.

Todos los componentes para el tipo de quemador de atomización por presión, están generalmente agrupados con el ventilador, la bomba del combustible, las válvulas de suministro de combustible y

aire, el sistema de ignición y la cabeza del quemador para producir un quemador automático tipo paquete, este tipo de quemador es el utilizado en la C492. (Figura 4.5)



Figura 4.5 Quemador tipo paquete para combustible Líquido

Este quemador contiene los siguientes elementos: ventilador, bomba de combustible y caja de control integrada. Dos boquillas intercambiables de 5.1 o 7.57 l / h (1.35 y 2.0 galones americanos / h) y trabaja a presiones de 70 a 125 kPa (100 a 180 psi) con ángulo de aspersión de 60° con capacidad para suministrar aproximadamente hasta 110 kW de calor.

Al igual que en el quemador de gas, el quemador de combustible líquido también tiene un dispositivo de falla de flama, que es una foto celda apropiada para las flamas luminosas.

4.4.1 Foto celda

Es un sensor de luminosidad “percibe luz” permite el paso de corriente; la oscuridad provoca que el circuito este abierto. Este dispositivo activa la válvula solenoide de cierre rápido de combustible que se encuentra en la bomba, a través de la caja de control.

4.4.2 Caja de control

La caja de control para el quemador de combustible líquido es más pequeña en comparación con la que tiene el quemador de gas, esta caja no tiene un disco de colores que nos indique las posibles fallas que puedan estar ocasionando que el quemador no encienda, puesto que es más fácil quemar combustible líquido, y no se requieren tantos controles. La caja de control está acoplada a un motor síncrono que mueve al ventilador, y en este caso también a la bomba de combustible. La caja de control es el sitio desde donde se controla el inicio del ciclo y los procesos durante el mismo, como lo sería una falla de flama que se detecta por medio de la foto celda. El flujo de aire es controlado por una compuerta (damper) en la succión del ventilador del quemador. El aire y la presión del combustible líquido, son sensados continuamente por la caja de control y cuando cualquiera de los dos es insuficiente para garantizar el adecuado funcionamiento del quemador, el quemador es apagado automáticamente.

4.4.3 Válvula de tres vías

La válvula de tres vías es un mecanismo que sirve para seleccionar el combustible líquido a quemar. La posición horizontal de la palanca indicará la línea de succión del combustible que se esta empleando, si la palanca se encuentra en posición vertical va a permitir el paso de una mezcla de los dos combustibles líquidos.

4.4.4 Suministro de combustible.

El combustible líquido se almacena en dos tanques de polietileno de 20 litros, los cuales son movibles para su llenado y almacenamiento cuando la unidad no esta en uso. Éstos se colocan debajo del panel de control. El combustible líquido es bombeado de uno u otro tanque a través de las mangueras de combustible que cruzan la válvula de tres vías. Las tuberías se juntan en una bomba de cebado, que es accionada manualmente y es utilizada para bombear el combustible antes de encender el quemador, también se encuentran una válvula aisladora de 90° y un filtro, todos localizados en la posición de operación en el lado derecho del tablero delantero. La manguera de salida del filtro se conecta al orificio de succión de la bomba del quemador.

La presión del combustible es elevada en la bomba hasta la presión de descarga y está es medida por un manómetro. El gasto de flujo de combustible es medido por un pequeño dispositivo de desplazamiento positivo con el despliegue del gasto volumétrico en el panel de control. El combustible pasa entonces a la boquilla dónde forma un cono de atomizado a presión, y se mezcla con aire y posteriormente se quema. La variación de la presión de la bomba controla el flujo de combustible, y la entrada de calor a la cámara.

4.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Se realiza por medio de agua que circula por la camisa de la cámara. El agua entra por la parte posterior de la estructura de soporte, a través de una válvula aisladora de 90°, ésta es la válvula principal de suministro a la cámara de combustión, el flujo, que es medido por un sensor de orificio, se controla por medio de una válvula de control de flujo colocada en el lado izquierdo del panel de control. La temperatura de entrada es medida al entrar en la cámara por debajo de la parte frontal. El agua pasa desde la cima posterior de la cámara al fondo del plato posterior y la salida es a través de una tubería que se encuentra en la cima del plato trasero que esta en la parte final de la cámara.

La tubería de salida tiene un interruptor de flujo de agua para controlar el flujo adecuado de está el interruptor es del tipo de lamina de arrastre, y un termo par doble para medir la temperatura de salida de agua tanto para el indicador como para el disyuntor de alta temperatura. Un sensor capilar envía la medición de la temperatura de salida del agua de enfriamiento al medidor de temperatura de agua. El agua sale por la parte posterior de la estructura de soporte hacia un desagüe abierto.

También se cuenta con dos acoplamientos de sello a la entrada y salida de la tubería de agua de enfriamiento esto permite que se conecte la sonda de gases de combustión enfriada por agua.

4.6 PÁNEL DE CONTROL

El panel de control es el lugar donde se controlan y registran todas las variables de la cámara de combustión, como puede ser el gasto de agua de enfriamiento, las diferentes temperaturas que se registran, como por ejemplo la temperatura de entrada del agua de enfriamiento, la temperatura de salida de los gases de la combustión, etc.

Este se encuentra en la parte frontal de la cámara de combustión. (Figura 4.6)

Como puede apreciarse en la figura, sobre el panel de control se encuentra el medidor de flujo de combustible líquido, el cronómetro para medir el tiempo que tarda en pasar 0.0283 m^3 (1 ft^3) de combustible gaseosos, el control de temperatura de agua de enfriamiento, el selector y la pantalla de temperaturas, el medidor de flujo de agua de enfriamiento, las lámparas indicadoras de flujo de agua, de temperatura de agua de salida, así como los interruptores de encendido y apagado del quemador, como también el contacto que le proporciona energía al quemador.

4.7 INSTRUMENTACIÓN EN EL PANEL DE CONTROL

Esta unidad cuenta con los siguientes instrumentos:

- ✓ Interruptor principal.
- ✓ Interruptor de encendido – apagado del quemador.
- ✓ Medidor de flujo de agua de enfriamiento. (Display digital que indica el flujo de agua de enfriamiento en g/s)
- ✓ Indicador de temperatura. (Display digital que indica la temperatura en °C con una resolución de $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$).
- ✓ Una perilla para elegir la temperatura (mostrada en el indicador de temperatura) de:
 - La temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y a la salida.
 - La temperatura del aire de entrada y la temperatura de los gases de escape.
 - La temperatura de la sonda de flama.
- ✓ Control de temperatura de agua de enfriamiento.
- ✓ Luces de estado para el flujo de agua y temperatura.
- ✓ Luces indicadoras del(a):
 - Quemador encendido (verde), quemador apagado (rojo).
 - Flujo de agua: bajo (rojo), adecuado (verde).
 - Temperatura del agua: alta (rojo), correcta (verde).
- ✓ Control de temperatura del agua: activado (ámbar). El quemador se restablece para su encendido cuando la temperatura alcanza sus parámetros normales.
- ✓ Dial.- cronómetro para poder obtener el tiempo en segundos que tarda en consumirse 0.0283 m^3 (1 ft^3) de gas.
- ✓ Un medidor de flujo de combustible. Este display digital (LCD) indica el flujo de combustible en l/h. Está calibrado para combustible ligero.
- ✓ Instrumentación adicional:
 - Termo pares
 - Sondas
 - Medidores de flujo, etc.

4.8 SISTEMAS DE SEGURIDAD

Los sistemas de seguridad nos permiten controlar las variables críticas de la cámara de combustión, como son: la temperatura, el flujo de agua y la corriente eléctrica que pasa por el panel de control. Estos controles tienen como fin evitar daños en la cámara por sobrecargas o incrementos elevados de temperatura.

4.8.1 Control de temperatura de agua de salida (corte)

Se encuentra en la parte final de la tubería del agua de enfriamiento a la salida de la tapa posterior de la cámara de combustión que es el último paso del agua de enfriamiento. Este control apaga al quemador si la temperatura (t_2) del agua de enfriamiento a la salida de la cámara excede la temperatura del control de temperatura del panel de control (generalmente 80°C). Restableciendo automáticamente al quemador cuando la temperatura del agua de enfriamiento baja aproximadamente 7°C .

4.8.2 Interruptor de flujo de agua

Se encuentra en la parte final de la tubería del agua de enfriamiento antes del control de temperatura del agua de salida. Apaga el quemador si el flujo del agua de enfriamiento se encuentra por debajo de 160 g/s aproximadamente. El quemador debe reiniciarse manualmente al tenerse nuevamente un flujo superior a 160 g/s aprox.

4.8.3 Pastilla para sobrecarga (Interruptor principal)

El interruptor principal termomagnético opera como un interruptor de encendido y apagado (On/Off) para el corte por sobrecarga ó en caso de un corto a tierra, este se encuentra dentro del panel de control.

4.8.4 Corta circuito de corriente residual

Corta la corriente dentro de la unidad si ésta a la entrada difiere con la de salida en más de 30 mA, como en un corto circuito, también se encuentra dentro del panel de control.

4.8.5 Purga y encendido

Ambos quemadores tienen una secuencia automática de encendido, que involucra un período de purga, encendido de la chispa y entonces se permite la admisión de combustible.

4.9 CHIMENEA

La chimenea es construida con tubos de láminas de acero inoxidable, tienen un diámetro de 10 pulgadas. La chimenea se conecta a la cámara de combustión con un codo de 90°, este codo tiene en el lado izquierdo dos puertos para medir las temperaturas de los gases de escape (T_4). Uno está muy cerca del cuerpo de la cámara y puede observarse la flama del quemador y debido a esto puede absorber el calor radiante mediante un pirómetro, el otro se encuentra mas alejado del cuerpo de la cámara, debajo del punto de análisis de gases de escape y este contiene un termopar que censa la temperatura de salida de gases de combustión a continuación esta colocada la capucha de arrastre de aire.

Esta permite la entrada inmediata de aire del medio ambiente para disminuir la temperatura de los gases de combustión que la cámara produce a altas temperaturas. El extremo superior de esta capucha es de 250 mm (10") de diámetro y sirve como base para colocar las secciones de la chimenea y es el punto sobre el cual se localiza el origen de los gases de escape, en la parte final de la chimenea está colocado un capuchón para no permitir el paso de la lluvia al interior de la cámara.

4.10 Estructura de Soporte

La estructura de soporte es de ángulo de acero de 25mm con estantes de lámina de calibre 16 SWG, mide aproximadamente 1.56 m de alto por 1.8 m de largo por 0.8 m de ancho; tiene la función de sostener todo el equipo que constituye la cámara de combustión C492.

CAPÍTULO 5

INSTALACIÓN DEL EQUIPO

5.1 LOCALIZACIÓN

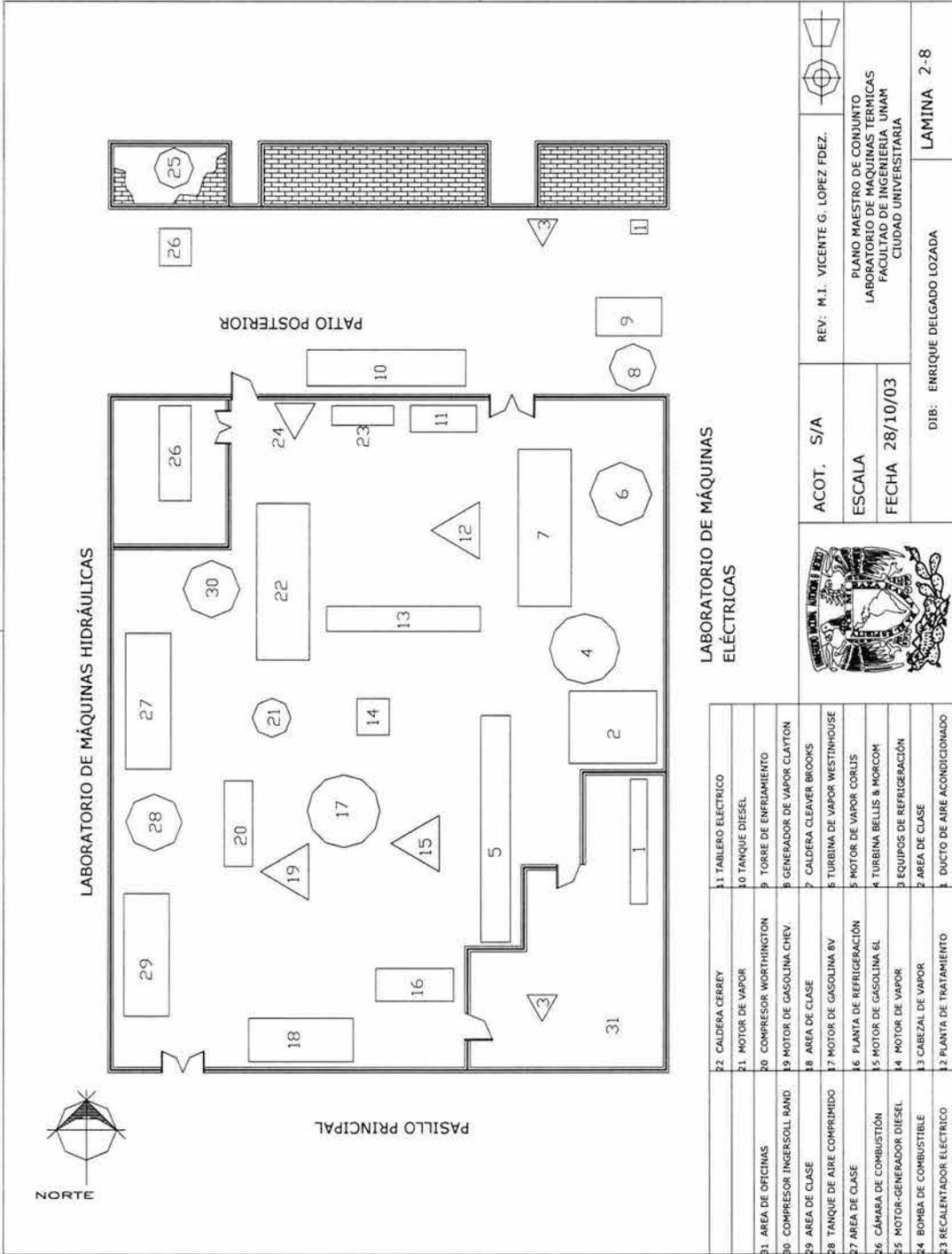
Al instalar la Cámara de Combustión debe considerarse cuidadosamente las facilidades para la conexión de suministro de los combustibles líquidos y gaseosos, agua de enfriamiento, energía eléctrica, drenaje, chimenea y ventilación. Se recomienda dejar amplio espacio alrededor de la unidad para facilitar la operación y mantenimiento.

El fabricante recomienda que el local donde la Unidad esté instalada debe tener acceso directo al exterior del edificio; sin embargo debido a las limitaciones físicas del lugar de instalación, la Unidad se encuentra situada en la parte superior del cuarto del Motor Diesel; que se limita a un espacio de 4.5 x 3.5 m, en la lámina 2-8 se muestra un plano de LAYOUT del L.M.T. y el sitio de instalación de la Cámara de Combustión.

Las dimensiones de la Cámara de combustión son las siguientes:

- Altura 1.56 m
- Ancho 0.8 m
- Largo 1.8 m

Peso 250 kg para unidades de 220 V (+10 kg para unidades de 110 V)



LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

22 CALDERA CERREY	11 TABLERO ELÉCTRICO
21 MOTOR DE VAPOR	10 TANQUE DIESEL
31 AREA DE OFICINAS	9 TORRE DE ENFRIAMIENTO
30 COMPRESOR WORTHINGTON	8 GENERADOR DE VAPOR CLAYTON
29 AREA DE CLASE	7 CALDERA CLEAVER BROOKS
28 TANQUE DE AIRE COMPRIMIDO	6 TURBINA DE VAPOR WESTINGHOUSE
27 AREA DE CLASE	5 MOTOR DE VAPOR CORLIS
26 CÁMARA DE COMBUSTIÓN	4 TURBINA BELLIS & MORCOM
25 MOTOR-GENERADOR DIESEL	3 EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN
24 BOMBA DE COMBUSTIBLE	2 AREA DE CLASE
23 RECALENTADOR ELÉCTRICO	1 DUCTO DE AIRE ACONDICIONADO



ACOT. S/A	REV. M.I. VICENTE G. LOPEZ FDEZ.
ESCALA	PLANO MAESTRO DE CONJUNTO
FECHA 28/10/03	LABORATORIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS
	FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
	CIUDAD UNIVERSITARIA
DIB: ENRIQUE DELGADO LOZADA	LAMINA 2-8

5.2 REQUERIMIENTOS DE VENTILACIÓN

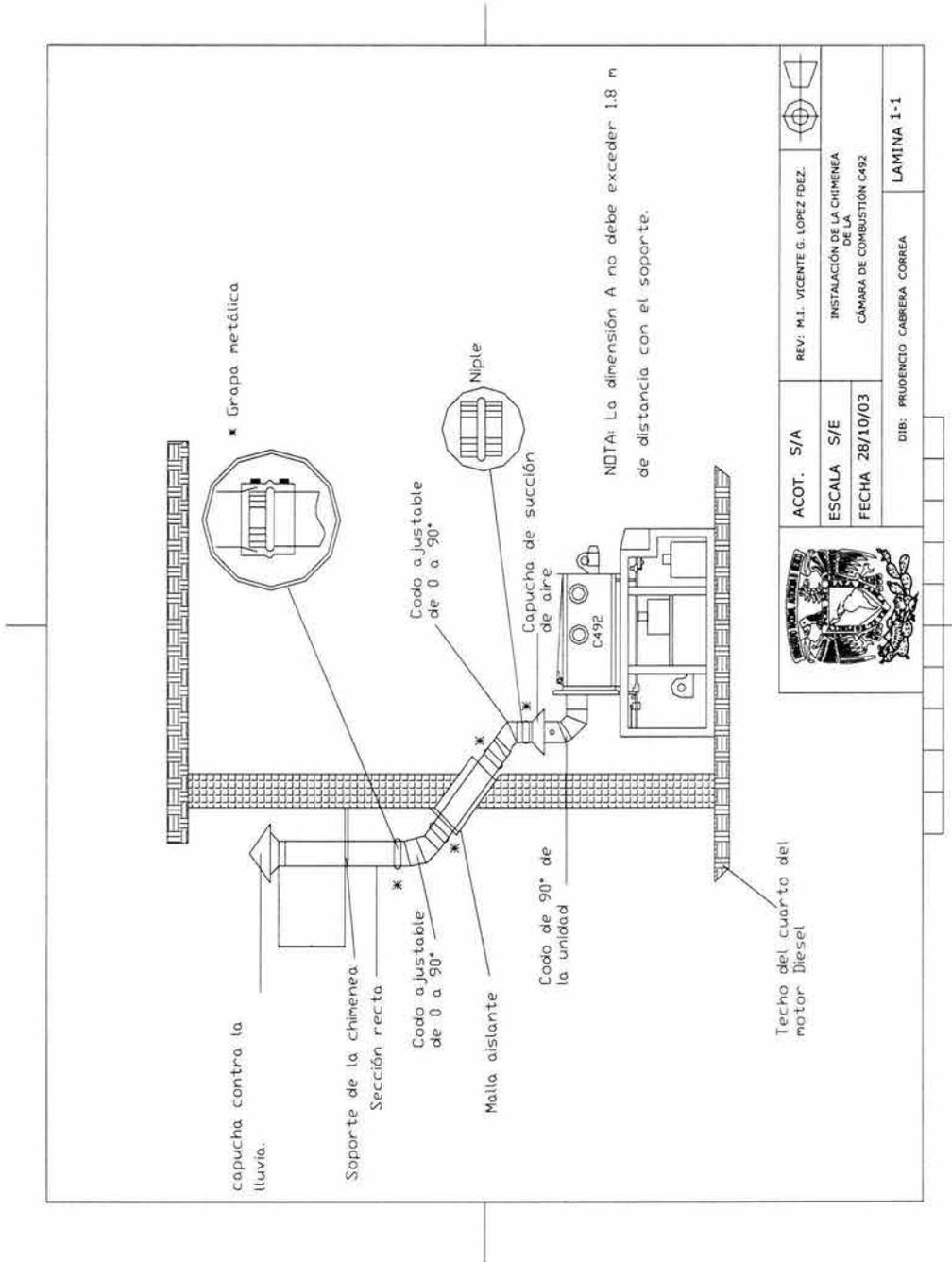
Una ventilación adecuada es de primordial importancia para la correcta operación de la Cámara de Combustión. Debe suministrarse el aire necesario para la combustión, así como también la disipación de calor generado por radiación, ya que debido a esto se eleva la temperatura del local. Es importante también el no excederse en la ventilación, ya que se pueden crear corrientes de polvo, siendo éste altamente perjudicial para los controles de la Cámara de Combustión.

El fabricante recomienda los siguientes valores como una guía:

- a) Para la combustión se necesita $3 \text{ m}^3/\text{min}$ cuando se quema gas LP (el combustible con el consumo de aire más alto) + la ventilación general, dando un total a aproximado de $8 \text{ m}^3/\text{min}$.

5.3 CHIMENEA

La única finalidad de la chimenea, en la Cámara de Combustión, es la de conducir los productos de la combustión a la atmósfera. Se recomienda que la chimenea sea de la menor longitud posible, y que no contenga tramos horizontales (o sólo pequeñas secciones horizontales) o curvaturas de ángulos agudos. Cuando la chimenea atraviesa una pared al exterior, deberá ser utilizada una sección aislante que tenga una abertura pequeña de aire para prevenir altas temperaturas que alcancen la estructura de la pared. El exterior debe comprender un arreglo vertical y terminar sobre cualquier tejado circundante dentro de un radio de 10 metros con una capucha de lluvia en el extremo final de la chimenea. El material empleado en la chimenea debe resistir altas temperaturas ($800 \text{ }^\circ\text{C}$), producidas por los dos tipos de combustible usados en la cámara, ya sea gas o combustible líquido. Las secciones antes mencionadas se proporcionan junto con el equipo Hilton para construir la chimenea que es de una sola medida, la pared debe permitir el paso del aire externo para enfriar la sección de la tubería de gases de escape a lo largo de su longitud. (Ver Lámina 3-8).



5.4 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES

La Cámara de Combustión C492 cuenta con un quemador para combustibles líquidos y un quemador para combustibles gaseosos, ya sea gas L.P. o gas natural. Los sistemas de alimentación que requiere cada quemador se describe a continuación:

5.4.1 Sistema de Alimentación para Combustibles Gaseosos

Existen dos tipos de combustibles gaseosos que puede manejar el quemador para combustibles gaseosos, la diferencia entre cada uno de ellos radica principalmente en la boquilla del quemador y en las líneas de alimentación que proveen de combustible al quemador.

5.4.1.1 Gas L.P.

El abastecimiento de gas L.P. proviene de un tanque estacionario con capacidad de 1,000 lt y se localiza en la parte exterior del Laboratorio. El suministro de gas L.P. debe ser adecuado y constante en todo tiempo; lo cual implica que no debe haber grandes demandas en otras salidas de la misma línea; y si se presenta el caso, es incorrecto operar los equipos simultáneamente; ya que se presentaría un funcionamiento errático del quemador y dará como resultado lecturas inexactas durante las pruebas en la Cámara de Combustión.

La Cámara de Combustión tiene instalado después de la línea de suministro de gas L.P. un regulador de alta presión para asegurar que la presión de entrada a la unidad esté por debajo de 200 kPa (condiciones de diseño). Se encuentran instalados antes y después del regulador de alta presión manómetros para verificar la presión de entrada y salida, posteriormente se encuentra una válvula de esfera y un regulador de baja presión de gas L.P. situado en la Unidad; éste reducirá la presión a 5 kPa o menos para su utilización en el quemador. La lámina 4-8 muestra el arreglo de las conexiones para gas L.P.

El regulador de baja presión de gas tiene una línea de alivio para dar salida al gas, en caso de que el diafragma del regulador se fracture. Para este propósito se instaló una manguera de ¼ pulgada en el regulador y el otro extremo se colocó fuera del laboratorio.

5.4.1.2 Gas Natural

La Cámara de Combustión puede quemar gas natural; sin embargo no se cuenta con una línea para el suministro de gas Natural, por lo que a continuación sólo se dan algunas especificaciones.

La línea principal de gas natural debe conectarse a la entrada de la tubería SBP de 3/4" en la entrada marcada con el mismo nombre, en la parte posterior de la estructura de soporte. La presión del gas debe ser menor de 5 kPa (50 cm o 20" columna de agua), y lo ideal es de 1.25 a 2 kPa (12.5 a 20 cm o 5" a 8" columna de agua). La lámina 4.8 muestra el arreglo de las conexiones de gas Natural en la parte posterior del equipo

5.4.2 Sistema de Alimentación para Combustibles Líquidos

A continuación se especifican algunas propiedades físicas de los combustibles que pueden quemarse en la C.C.

Combustible ligero:	viscosidad	0.015 - 0.055 cm ² /s @ 40°C (1.5 - 5.5 cSt @ 40°C)
	densidad	835 kg/m ³
Queroseno:	viscosidad	0.011 - 0.020 cm ² /s @ 40°C (1.1 - 2.0 cSt @ 40°C)
	densidad	790 kg / m ³

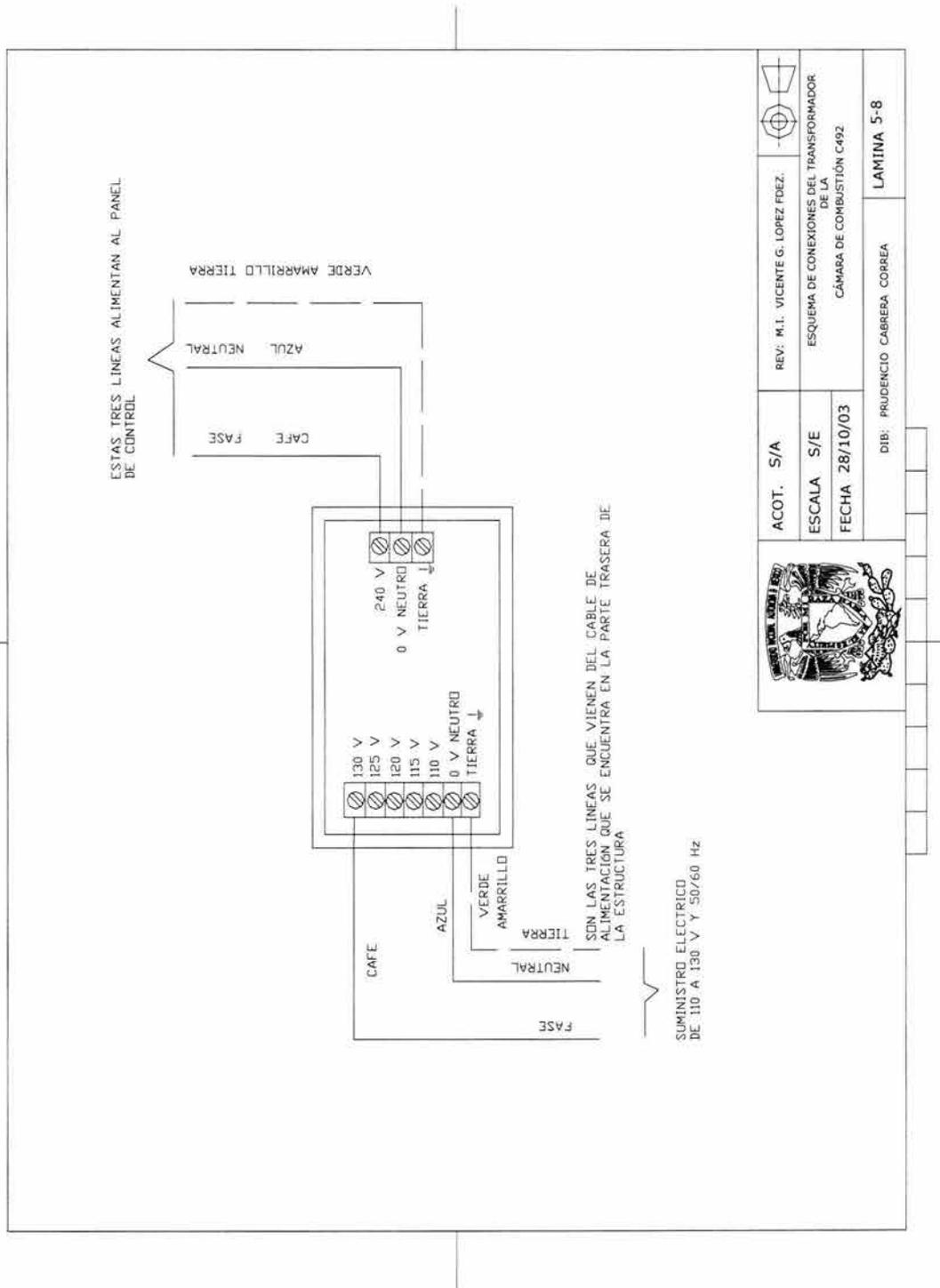
Máximo consumo 10 l/h aprox.

El quemador puede quemar diferentes combustibles líquidos como petróleo, Diesel, Queroseno, etc, o cualquier combustible que tenga las características de viscosidad y densidad anteriormente mencionadas.

5.5 SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La Unidad requiere para su correcto funcionamiento del sistema eléctrico, que el voltaje de entrada se encuentre entre 110 y 130 Volts. El cable de suministro eléctrico está conectado a una terminal de 110 V; y el transformador se encuentra conectado a 115 Volts, dentro del transformador se tiene un cable café conectado a la fase y un cable azul conectado a la terminal OV (neutral) y un cable verde / amarillo conectado en la terminal que va a tierra en el transformador. (Ver Lámina 5-8)

Antes del contacto en la línea de alimentación de energía eléctrica se encuentra instalado un interruptor termo-magnético de 10 Amperes, que actúa como protección en caso de sobrecarga.



5.6 SUMINISTRO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

Uno de los factores principales para la operación óptima de la Unidad, es el de contar con un sistema de suministro de agua adecuado, eso es debido a que es indispensable mantener un nivel de agua constante en el interior de la Cámara de Combustión, para que no ocurra un siniestro o falla de alguno de sus componentes.

La unidad cuenta con una camisa de agua alrededor de la cámara de combustión, la cual requiere un suministro continuo de agua para eliminar el calor generado durante la combustión; el agua de enfriamiento entra por la parte posterior de la Unidad por medio de una manguera flexible de $\frac{1}{2}$ plg, y se encuentra conectada a una toma de la red de suministro de agua en el laboratorio, la toma tiene una presión de 58 kPa – 64 kPa, con un gasto de agua superior a los 1500 l / h

5.7 PURGAS

En la Cámara de Combustión se tiene válvulas de purgas en la parte inferior y una línea de salida del agua de enfriamiento, las cuales se descargan al drenaje abierto a través de una manguera flexible de $\frac{3}{4}$ plg.

CAPÍTULO 6

OPERACIÓN DEL EQUIPO

6.1 GENERALIDADES

Con las instrucciones de esta sección se pretende familiarizar al usuario con la operación de la Cámara de Combustión C492 de Hilton. Se proporcionan **Advertencias y Notas** para realzar la importancia de alguna instrucción en particular.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento del equipo, en las siguientes secciones, los nombres de los elementos en los dos diagramas esquemáticos proporcionados se escriben en el tipo de letra **negrita**. Por ejemplo el **medidor de flujo de agua de enfriamiento**.

En caso de alguna duda, consulte en todo momento los diagramas que se muestran en las figuras. 6.1 y 6.2, para cuando se haga uso del quemador de gas y del quemador de combustibles líquidos respectivamente.

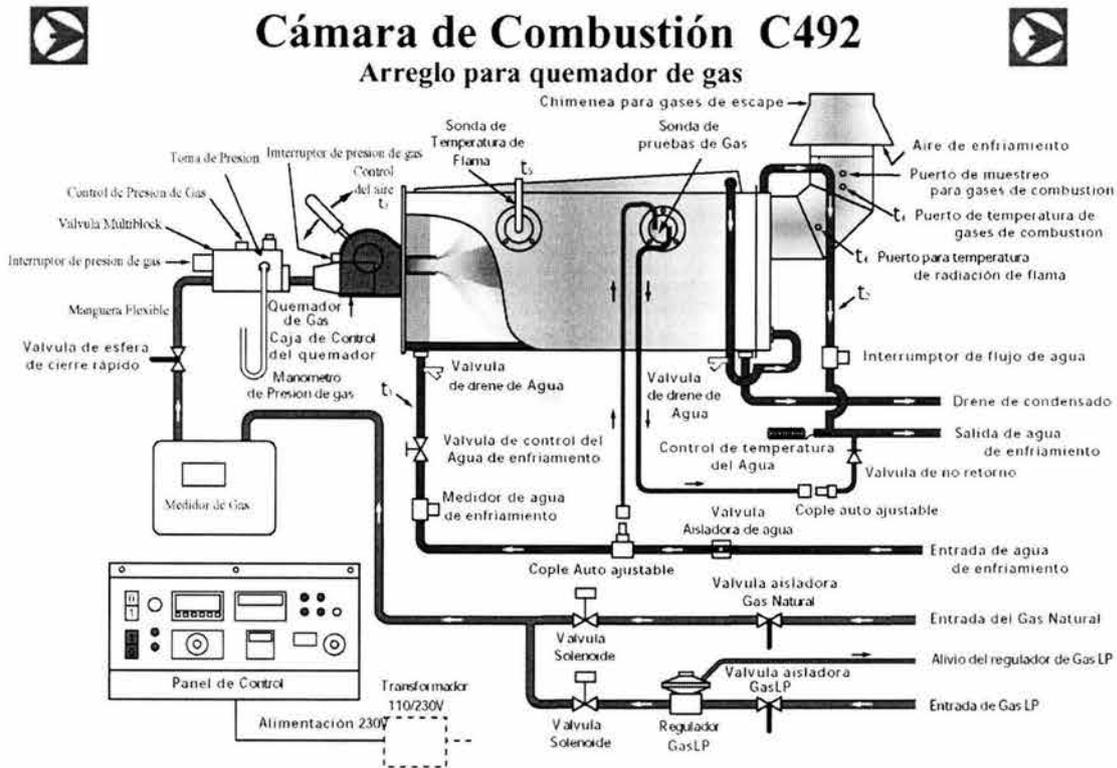


Fig. 6.1 Diagrama del arreglo con quemador de gas

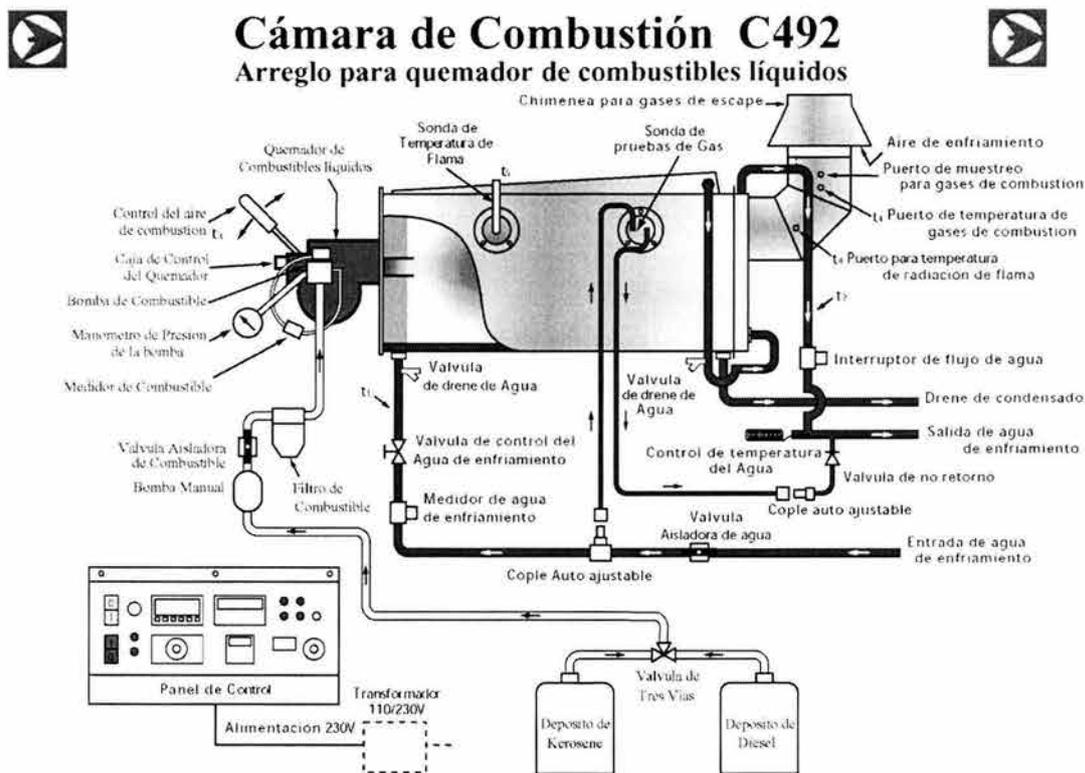


Fig. 6.2 Diagrama del arreglo con quemador de combustibles Líquidos

6.2 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DESPUÉS DE UN PERIODO LARGO FUERA DE OPERACIÓN

NOTA: Las instrucciones que se describen a continuación solo se debe cumplir cuando el equipo ha estado fuera de operación por un largo periodo de tiempo (mas de 1 mes); si este no fuera el caso, puede consultar el procedimiento de operación del equipo en las secciones 6.3 y 6.4 según corresponda al tipo de quemador.

El procedimiento que se describe a continuación se debe realizar para prevenir daños a los usuarios y al equipo; por esta razón es importante verificar que se cumplan con cada una de las recomendaciones mencionadas. A continuación se detallan las instrucciones a seguir:

Cuidadosamente realice una inspección visual del equipo para verificar que sus componentes no se encuentren dañados, y si acaso un componente presentará algún defecto, se debe notificar inmediatamente al personal responsable y proceder al reemplazo de las piezas para el adecuado funcionamiento. Se deben verificar cada unos de los sistemas, utilizando el formato siguiente:

REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL

EQUIPO CAMARA DE COMBUSTIÓN C492		UNAM FACULTAD DE INGENIERIA LAB. MAQUINAS TERMICAS		Fecha:	
				Encargado:	
Sistemas		Condiciones			
		bien	mal	revisar	observaciones
Sistemas de suministro de combustibles	Línea de gas LP y accesorios				
	Línea de gas natural y accesorios				
	Línea de combustible líquidos				
Sistemas de agua de enfriamiento	Líneas de alimentación de agua de enfriamiento y accesorios				
	Línea de drene de agua de enfriamiento a la salida y válvulas de drene				
Sistemas eléctricos	Cable de alimentación de energía eléctrica				
	Bobina de ignición, accesorios eléctricos y panel de control				
Ducto de gases de escape	Condiciones de la tubería al interior del recinto				
	Condiciones de la tubería al exterior del recinto				
Estado general de las cajas de control de los quemadores					
Estado general de la cámara de combustión					

ESTE REPORTE ES SOLAMENTE UNA GUIA PARA INFORMACIÓN

6.3 PRUEBAS DE SEGURIDAD SIMPLIFICADAS PARA CUALQUIERA DE LOS DOS QUEMADORES

Una vez que se ha verificado visualmente el estado del equipo se continúa con las diferentes pruebas para revisar el estado de funcionamiento de los diferentes componentes, el procedimiento se describe a continuación:

- i. Conecte el suministro eléctrico y el interruptor principal en el **panel de control**. Los instrumentos deben iluminarse. Si el medidor de flujo de combustible líquido se despliega está en buen estado, cheque que éste despliegue las unidades l / h en lado derecho de la pantalla, y si no aparecen presione el botón negro pequeño que se encuentra en el medidor de flujo hasta que despliegue las unidades l / h.
- ii. Verifique que las dos **válvulas de drene** de la cámara estén cerradas. Abra el suministro de agua girando la válvula principal, y abra también la válvula que aísla el agua en la parte trasera de la unidad. Lentamente gire la **válvula de control del agua de enfriamiento** que se encuentra al frente de la unidad en el lado izquierdo del **panel de control** en dirección contraria a las agujas del reloj para permitir la entrada del agua. La pantalla del medidor de

flujo de agua debe cambiar de 000 a un valor positivo. Abra la válvula de agua de enfriamiento para obtener aproximadamente 100 g/s. El aire debe empezar a desplazar dentro de la cámara, el final de la manguera de drene de agua de enfriamiento debe estar abierto a la atmósfera. **Bajo ninguna circunstancia la manguera del desagüe debe bloquearse o cerrarse de forma alguna o la cámara se dañará.**

6.3.1 Prueba del Cortacircuito de Corriente Residual (RCCB)

Abra la tapa con bisagra del **panel de control**, teniendo el cuidado de sujetar bien la tapa para no dañar el tubo capilar del control de temperatura de agua de enfriamiento, y recordando que el tablero debe estar energizado. El interruptor de corto circuito se encuentra situado en el lado izquierdo de la barra de conexiones (bus), debe estar en la posición ON. Presione el botón marcado Test (prueba) o 'T' en el RCCB.

ADVERTENCIA: EN ESTA ETAPA DEL PROCEDIMIENTO NO TOQUE NADA MÁS DENTRO DEL TABLERO DE CONTROL, YA QUE EL TABLERO ESTARÁ ENERGIZADO.

La palanca grande en el RCCB debe colocarse del encendido (1) a la posición de apagado (O) inmediatamente la unidad aísla el suministro eléctrico. Si esto no ocurre, el RCCB esta defectuoso y necesita ser reparado o reemplazado por un electricista calificado.

Vuelva a colocar la palanca en la posición de encendido (1) y la unidad debe encenderse de nuevo.

Cierre la tapa del **panel de control**, pero no coloque los tornillos en esta fase.

6.3.2 Prueba del Medidor de Flujo de Agua de Enfriamiento

Aumente el flujo de agua girando la **válvula de control del agua de enfriamiento** para dar aproximadamente 200-230 g/s en la pantalla del medidor de flujo de agua. En esta etapa del proceso, las luces indicadoras del interruptor del flujo de agua de enfriamiento debe cambiar de rojo a verde, y la luz verde que indica la temperatura del agua de salida debe iluminarse. Compruebe que existe circulación de flujo de agua en la manguera de desagüe de agua de enfriamiento, esto indica que la camisa de la cámara está ahora llena de agua.

Reduzca el flujo de agua de enfriamiento utilizando la **válvula de control** para dar aproximadamente 150 g/s en el flujo de agua de enfriamiento. En esta etapa las luces indicadoras del interruptor de agua de enfriamiento deben cambiar de verde a rojo, y la lámpara de color verde que indica la temperatura del agua de salida debe estar apagada.

Gire la **válvula de control de agua de enfriamiento** para dar aproximadamente 200 g/s en el medidor de flujo de agua de enfriamiento. De nuevo las luces indicadoras del interruptor de flujo de agua de enfriamiento deben cambiar de rojo a verde, y la luz verde de la temperatura del agua de salida debe iluminarse. Con este procedimiento se ha verificado la función del interruptor de flujo.

6.3.3 Prueba del Disyuntor de Alta Temperatura del Agua de Enfriamiento

Abra la tapa con bisagra del **panel de control**, teniendo cuidado de apoyar bien la tapa para no dañar el tubo capilar del control de temperatura,

ADVERTENCIA: RECUERDE QUE EL TABLERO ESTARÁ ENERGIZADO

El controlador de temperatura del agua de salida se podrá ver hacia el lado derecho de la barra de conexiones, identificado por el disco graduado de (0 - 200°C), y una pequeña luz indicadora roja. Cuidadosamente gire este disco para reducir el rango de corte de temperatura en dirección contraria al sentido de las manecillas del reloj, para reducir la temperatura por debajo de la temperatura de suministro de agua y se debe observar que las lámparas de temperatura de agua de salida cambia de verde a rojo. Esto ha verificado el funcionamiento del disyuntor de alta temperatura del agua de enfriamiento a la salida de la cámara. Gire en el sentido de las agujas del reloj para retroceder el disco a 80°C como estaba inicialmente.

NOTA: La temperatura del agua de salida no debe estar colocada por arriba de 80°C por ninguna circunstancia.

Cierre la tapa del **panel de control**, y sujétela colocando los tres tornillos.

6.4 PRUEBAS DE SEGURIDAD SIMPLIFICADAS PARA EL QUEMADOR DE GAS

Con el suministro eléctrico aislado, (el quemador de gas esta instalado en la cámara de combustión Fig. 6.1) quite la tapa del control de presión de gas en la válvula multiblock y una los alambres entre las terminales negra y café (este procedimiento es temporal, y se quitara más tarde).

6.4.1 Detección de Fugas en la Tubería de Gas

Se encontrará un cable con un enchufe hembra de tres terminales sujetado en el lado derecho de la estructura de soporte, marcado como analizador de suministro de flujo de gas. Conecte el enchufe de 3 terminales del cable de prueba de las válvulas solenoide a este, y el otro extremo a la **válvula solenoide** de gas apropiado (Natural o LP). La **válvula solenoide** escogida debe activarse, al escuchar un 'clic' verifica su funcionamiento.

Conecte un extremo de la manguera del **manómetro diferencial** a la toma de entrada de la válvula multiblock marcada como presión del gas de entrada y la otra manguera se deja abierta a la atmósfera, después de haber girado el tornillo de la toma 1/2 vuelta para abrirlo. Abra la válvula del suministro de gas, y observe la presión del manómetro de gas. Aislé el gas girando la **válvula de esfera de cierre rápido** que se encuentra en la parte posterior de la cámara y verifique que la unidad no tiene ninguna fuga en la tubería, por lo cual no debe haber caída de presión en el **manómetro diferencial**. Si se sospecha de alguna fuga, aplique una solución de agua jabonosa a cada una de las uniones de la tubería de gas.

6.4.2 Control de la Válvula Multiblock

Cambie la conexión del **manómetro diferencial** a la toma de salida del gas de la **válvula multiblock** marcada como presión de gas a la salida, después de haber abierto el tornillo de la toma 1/2 vuelta, y habiendo cerrado el tornillo de la toma de presión de entrada. Asegúrese que no se observa ninguna presión positiva en el manómetro. Si la lectura no es igual a cero, la **válvula multiblock** no está cerrando correctamente y debe reemplazarse.

Quite el cable de prueba de la **válvula solenoide** y el enchufe hembra de tres pines del analizador de suministro de gas, y almacene la línea en otra parte (Caja de herramientas). Conecte el tapón cuadrado de la línea de poder del solenoide en el lado izquierdo de la estructura de soporte a la **válvula de solenoide** de gas apropiada (natural o LP). La **válvula solenoide** debe permanecer cerrada en esta fase.

6.4.3 Prueba de Aislamiento del Quemador

Con la **válvula de control del agua de enfriamiento** cerrada y el interruptor de flujo de agua encendido; la lámpara indicadora deberá estar en rojo, presione el botón verde para el encendido del quemador. Nada debe funcionar - el ventilador del quemador permanece fuera de operación y la **válvula solenoide** permanece cerrada.

6.4.4 Prueba del Control de Presión de Aire

Abra el flujo de agua para habilitar la luz indicadora verde. Aislé el gas girando 90° la **válvula de esfera de cierre rápido** de gas que se encuentra al frente en lado izquierdo del **panel de control**. Quite el tubo del interruptor de presión de aire. Apriete el botón verde del quemador on / off para encender el quemador. Observe si hay rotación en el ciclo de inicio del quemador en / off para colores que se encuentra en la caja de control del quemador, y verifique que el quemador y el ventilador se detienen en la línea negra dentro de la sección azul. Deberá iluminarse la luz indicadora roja del dispositivo de bloqueo del quemador y el botón de reposición del dispositivo de bloqueo de la caja de control del quemador. Pulse el botón de restablecimiento del dispositivo de bloqueo para reiniciar el quemador. Vuelva a conectar la manguera del control de presión de aire (a la conexión +). Pulse el botón de reposición del dispositivo de bloqueo para restablecer el quemador.

6.4.5 Prueba de Sonda de Ionización

Con el suministro eléctrico y de gas aislado, desatornille la tuerca que sujeta la parte superior del quemador y abra la cubierta girándola hacia fuera del plato delantero. Desatornille la tuerca y quite el cable de la sonda de ionización de flama. Cierre el quemador asegurándose que la cadena de frenado no quede atrapada en el hueco de la cubierta, conecte los suministros eléctrico y de gas, y se enciende el quemador pulsando el botón de reposición. Observe la rotación del ciclo del quemador en el indicador de rueda giratoria, y revise que el quemador y el ventilador se detienen en la línea negra dentro de la sección azul. La lámpara roja del quemador cierra todas las funciones y la lámpara reset, que cierra todas las funciones que se encuentra en la caja de control del quemador, debe estar iluminadas. Desconecte la unidad del suministro eléctrico, y conecte la sonda de ionización del quemador, coloque la tapa del quemador.

6.4.6 Prueba de Encendido

Con el gas aislado, vuelva a encender el quemador pulsando el botón de reposición del dispositivo de bloqueo en la caja de control. Observe que la rueda giratoria indicadora del quemador pasa por un ciclo, y verifique a través de la ventana de la cámara que se produzca la chispa de encendido. Compruebe que el ventilador se detiene en la sección amarilla. Deberán iluminarse la luz indicadora roja del dispositivo de bloqueo del quemador y el botón de reposición del dispositivo de bloqueo en la caja de control del quemador. Pulse el botón de reposición del dispositivo de bloqueo. Desconecte el suministro eléctrico y deshaga la unión de los alambres, que se realizó al principio, del control de presión de gas.

6.4.7 Prueba del Interruptor de Presión de Gas

Quite la tapa del interruptor de presión de gas, y gire el disco en el sentido de las agujas del reloj para reducir el rango, hasta el valor mínimo. Esto asegura que la presión mínima permitirá que el quemador se encienda.

Abra las dos **válvulas de aislamiento** de gas de 90°. Vuelva a encender el quemador pulsando el botón de reposición del dispositivo de bloqueo en la caja de control del quemador. Observe que la rueda indicadora del ciclo del quemador pasa por un ciclo, y compruebe que el quemador encienda en la sección naranja, y la rueda indicadora de ciclo se detenga en la sección blanca. Deberá

iluminarse la lámpara verde de encendido del quemador, con el quemador funcionando. (Observe que pueden ser necesarios varios intentos antes que la flama aparezca debido al purgado de aire de la línea de gas. (Pulse el botón reset antes de realizar un nuevo intento)

Gire el disco del control de presión de gas en la dirección de las agujas del reloj para ajustar el valor del control, hasta que el quemador se apague. Gire lentamente el disco de control en la dirección contraria a las agujas del reloj hasta que el quemador vuelva a encender con éxito, luego gire el disco de control de presión de gas dos divisiones más en la dirección contraria a las manecillas del reloj, y vuelva a colocar la tapa del control de presión de gas. (Observe que la rueda indicadora del ciclo del quemador se pondrá en marcha cuando el control se gira en la dirección contraria a las manecillas del reloj, indicando que sería posible el encendido).

Con el quemador en funcionamiento, gire lentamente el control de disco de temperatura de agua hasta que el quemador detenga su funcionamiento. Revise que la lámpara color ámbar se ilumina y la lámpara verde del encendido del quemador se apaga. Posteriormente permita el paso de agua de enfriamiento abriendo la **válvula de control** de flujo de agua y asegúrese que la lámpara ámbar se apaga, el quemador pasa automáticamente por el ciclo de encendido y debe empezar a funcionar, con la lámpara de encendido del quemador en color verde.

Con el quemador encendido de manera normal, presione el botón rojo del quemador on/off marcado con "0" que esta sobre el tablero, y asegúrese que el quemador se apaga inmediatamente, y con esto se finaliza la prueba de seguridad del quemador de gas.

6.5 PRUEBAS SIMPLIFICADAS DE SEGURIDAD PARA EL QUEMADOR DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Se encuentra instalado el quemador para combustibles líquidos. (Fig. 6.2)

6.5.1 Prueba de Aislamiento del Quemador

Con la **válvula de control** flujo de agua de enfriamiento cerrada y la lámpara del interruptor del flujo de agua encendida en color rojo, presione el botón de color verde marcado con "1" para encender el quemador. **'Nada debe funcionar, el ventilador del quemador permanecerá apagado'**.

6.5.2 Prueba del Encendido

Aísle el suministro de combustible girando 90° la **válvula de esfera de cierre rápido** de combustible que se encuentra en la parte frontal del lado derecho del **panel de control**. Encienda el quemador y observe una chispa a través de la mirilla de la cámara.

La luz indicadora roja del dispositivo de bloqueo del quemador y el botón de reset en la caja de control del quemador deben iluminarse

Abra la válvula aisladora del combustible; afloje el acoplamiento en el fondo de la bomba de combustible del quemador. Presione con la mano la **bomba manual** (primera bomba) hasta que se entregue combustible dentro del cople y este empiece a gotear, acople la línea.

6.5.3 Prueba de Detección de Falla de Flama

Encienda el quemador pulsando el botón reset del dispositivo de bloqueo. Y deje que se encienda el quemador. Quite la foto celda, y cubra con una tela, revise que el quemador se detiene por falla de flama, la luz indicadora roja del dispositivo de bloqueo se ilumina y el botón reset, esto indica que el quemador esta fuera de operación. Nótese que el control de cierre es un dispositivo térmico y toma aproximadamente 30 segundos para que se restablezca (se deberá escuchar un clic) después del cual se iluminara el botón de restablecimiento y este puede ser presionado.

Deje fuera la foto celda, y expóngala a la luz del cuarto. Reinicie el quemador apretando el botón de restablecimiento que se encuentra en la caja de control de quemador, con el suministro de combustible listo. Compruebe que el quemador esté fuera de operación por falla de flama, con la lámpara de control del quemador iluminada en color rojo y el botón de restablecimiento iluminado en la caja de control del quemador.

Vuelva a colocar la foto celda y reinicie el quemador después de 30 segundos. Con el quemador funcionando, gire el disco de control de temperatura para disminuir el rango de temperatura de agua hasta que se detenga el encendido de la flama del quemador, revise que la luz indicadora de color ámbar se ilumina y la luz verde del quemador se apaga. Permita el paso del agua de enfriamiento y asegúrese que la lámpara color ámbar se apague; el quemador pasa automáticamente por el ciclo de inicio y el encendido se restablece automáticamente, con la lámpara verde del quemador encendida.

Con el quemador funcionando de manera normal, presione el botón rojo del quemador on/off marcado con "O" en el **panel de control**, y asegúrese que la flama del quemador se extingue inmediatamente. Y con esto se finaliza el chequeo de seguridad del quemador para combustible líquido.

6.6 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL QUEMADOR DE GAS

Antes de arrancar la unidad.

ADVERTENCIA: EN TODO MOMENTO DEL PROCESO DE ARRANQUE QUE SE DESCRIBE A CONTINUACIÓN, LA UNIDAD DEBERÁ ESTAR DESCONECTADA DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO.

Si está instalado el sistema del quemador de combustible líquido se deberán seguir con las instrucciones que se describen a continuación:

1. Asegure que la **válvula aisladora** de combustible líquido esté cerrada.
2. Destornille y desconecte el tapón de 7 terminales del enchufe de energía del quemador situado en el **panel de control**.
3. Desconecte la terminal del medidor de flujo de combustible que se encuentra en el lado derecho del **panel de control**.
4. Desconecte el cople de la manguera de combustible líquido desde el orificio de succión de la bomba, con una llave inglesa de 17 mm. Vacíe la línea de succión de la bomba de combustible líquido en la bandeja de goteo, y atornille el cople de la manguera en el niple de almacenamiento, localizado en la parte trasera del plano vertical de la estructura de soporte; apriete el cople con la mano. Coloque el tapón obturador en el conector del orificio de la bomba de combustible líquido, para evitar que entre polvo o alguna otra impureza que pueda dañar el adecuado funcionamiento de la bomba.
5. Quite la bandeja de goteo que se encuentra debajo del quemador; en el plato horizontal de la estructura de soporte.
6. Destornille las dos tuercas M12 que sostienen el quemador de combustible líquido usado la llave inglesa de 19 mm.
7. Retire el quemador de combustible líquido del plato delantero y guárdelo en el sitio previsto para almacenar el quemador, el cual se encuentra en la parte inferior trasera de la estructura de soporte o en algún otro sitio seguro.

6.6.1 Preparación del Quemador de Gas

Coloque el quemador de gas sobre los dos tornillos de montura y sujételo con las dos tuercas M12 utilizando una llave inglesa de 19 mm, mientras se asegura que la junta se encuentre en la posición adecuada entre el plato delantero y el quemador.

Conecte y atornille con la mano el tapón de 7 terminales en la toma de energía del quemador de gas que se encuentra en el **panel de control**.

Coloque los acoplamientos de la manguera flexible de gas al final de la **válvula de aislamiento** y el otro extremo a la entrada de la **válvula multiblock**.

Conecte el tapón cuadrado de 3 orificios en la **válvula solenoide** de gas apropiado (gas natural o gas LP).

Conecte la manguera del **manómetro diferencial** en el toma de presión a la salida de la **válvula multiblock**, después de haber abierto el tornillo de ajuste fino de presión ½ vuelta.

En la **válvula multiblock**, gire el control de presión de gas totalmente en el sentido de las agujas del reloj (máximo), y después dé 5 giros en sentido anti horario.

6.6.2 Puesta en Marcha de la Unidad con Quemador de Gas

Conecte el suministro eléctrico, cerrando el circuito del interruptor principal y el interruptor en el **panel de control**. Los instrumentos deben iluminarse.

Nota: La luz indicadora de temperatura del agua de salida no debe iluminarse hasta que la luz del interruptor de flujo de agua esté en verde.

Abra la **válvula del suministro** principal de agua, y la **válvula aisladora** que se encuentra en la parte trasera de la unidad. Despacio gire la **válvula de control** de flujo de agua de enfriamiento en sentido contrario a las manecillas del reloj para permitir la entrada del agua; la **válvula de control** de flujo de agua se localiza al frente de la unidad en el lado izquierdo del **panel de control**. La pantalla del medidor de flujo de agua de enfriamiento debe cambiar de 000 a un valor positivo.

Abra la válvula para dar aproximadamente 200 g/s. La luz indicadora del interruptor de flujo de agua debe cambiar a verde, y la luz indicadora de temperatura de agua de salida también cambia a color verde.

Asegure que la perilla del control de temperatura de agua, que se encuentra en el panel de control, esté fija en 80 ° C.

Abra el suministro de gas a partir de la válvula de la línea principal de alimentación, y gire 90° la **válvula de esfera de cierre rápido**, que se encuentra en la parte trasera de la unidad, asegurándose que la presión de suministro de gas no sea mayor a los valores declarados (20 kPa para el gas LP, 5 kPa para el gas natural).

Gire 90° la palanca de la **válvula aisladora secundaria**, esta se encuentra al frente de la unidad, y cheque que el manómetro diferencial marque 0 mbar.

Coloque la compuerta del control de aire (damper) del quemador en la posición No. 4.

Oprima el botón ' 1 ' verde on/off del quemador. El indicador de ciclos de rueda del quemador que se encuentra dentro de la caja de control del quemador, debe comenzar a girar. En la sección azul el ventilador debe empezar a funcionar.

Nota: Si el ciclo empieza con la rueda en una posición diferente a la sección blanca, entonces un ciclo de la rueda pasará antes de que el ventilador empiece a funcionar. Esto asegura una purga de aire o de cualquier gas no quemado.

En la sección naranja de la rueda indicadora del ciclo del quemador, se producirá la chispa de la ignición, y en la sección amarilla el flujo de gas será admitido y encenderá. La luz indicadora verde del quemador se iluminará cuando el quemador esté encendido. En caso de que no se produzca el encendido, la válvula solenoide se cerrará en 3 segundos, y se producirá el bloqueo al detectarse que no existe flama.

Nota: Si el quemador de gas ha sido instalado en lugar del quemador de combustible líquido, pueden necesitarse varios ciclos para purgar el aire de la tubería de gas, ya sea gas natural o gas L.P.

El quemador ahora deberá estar funcionando normalmente y el gasto de gas puede ajustarse con el tornillo de control de presión. El tornillo se gira en el sentido de las manecillas del reloj para incrementar la presión y viene marcado con las señales '+' y '-'. El aire se ajusta mediante la compuerta de control de aire del quemador (damper).

6.6.3 Paro de Emergencia

En cualquier momento el quemador puede ser inmediatamente detenido solo presionando el botón rojo "0" de on/off que se localiza en el **panel de control**

6.6.4 Apagado del Quemador de Gas

Al igual que el paro de emergencia, presione el botón rojo de encendido y apagado del quemador marcado con "0" que se encuentra en el panel de control. (Si el quemador se va a apagar por un período largo, como por ejemplo al final de semestre, se recomienda que la **válvula aisladora principal** que se encuentra fuera de la unidad sea cerrada, y permitir que la flama del quemador se apague, después de haber consumido todo el gas dentro de la tubería de trabajo. Apriete el botón rojo "0" en el panel de control para evitar que el quemador vuelva a iniciar un ciclo para reiniciar).

Asegúrese que todas las **válvulas de aislamiento** de gas estén cerradas, ambas válvulas en la unidad y la válvula aisladora de la línea de suministro principal que está fuera de la unidad.

Se recomienda cerrar la **válvula de control** de flujo de agua cuando la diferencia de temperaturas del agua de enfriamiento a la entrada y la salida sea menor a 10 °C, posteriormente se deberá cerrar la **válvula de aislamiento de agua** de la Unidad que se encuentra en la parte posterior, así como la válvula principal que está fuera de la unidad

Apague el interruptor principal de la unidad que se encuentra en el **panel de control**, y el interruptor de aislamiento que se encuentra fuera de la unidad.

6.7 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL QUEMADOR DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NOTA: En todo momento del proceso que se describe a continuación, la Unidad deberá estar desconectada del suministro eléctrico.

6.7.1 Procedimiento para el cambio del quemador

Coloque el quemador de combustible en los dos tornillos de montaje, y sujételo con las dos tuercas M12 usando la llave inglesa de 19 mm, mientras se asegura que la junta esté en la posición entre el plato delantero y el quemador.

Conecte y atornille el tapón de 7 terminales en el enchufe de control del quemador situado en el **panel de control**.

Conecte el tapón de tipo del medidor de flujo de combustible en la toma que se encuentra situada en el lado derecho del **panel de control**.

Remueva el tapón blanco de la toma de succión de la bomba de combustible. Destornille la manguera de combustible del acoplamiento de almacenamiento que se encuentra detrás del plato vertical de la estructura de soporte. Atornille la manguera sobre la toma de succión de la bomba de combustible, en esta etapa solo apriete con la mano la tuerca cople de la manguera.

Coloque la bandeja de goteo del quemador debajo de este; sobre la placa horizontal de la estructura de soporte.

Asegúrese que haya combustible suficiente en el tanque (o en los tanques) para ser usado durante la prueba. (Un tanque lleno de 20 litros debe durar 2 horas de fuego continuo en el rango de quemado más alto). Los tanques tienen un tubo de inmersión conectado a la manguera de succión mediante un tapón roscado, que no deberá atornillarse para permitir la entrada de aire al tanque; se recomienda que la tapa solo esté sobrepuesta.

6.7.2 Puesta en Marcha de la Unidad

Encienda el interruptor del suministro eléctrico principal y el interruptor principal en el **panel de control**. La instrumentación debe iluminarse. (Nótese que la luz indicadora de temperatura de agua de salida no debe iluminarse hasta que el interruptor del de flujo de agua esté en verde).

Abra la **válvula aisladora principal** de suministro de agua, y la **válvula aisladora de agua** que se encuentra en la parte posterior de la unidad. Despacio gire la **válvula de control** de agua de enfriamiento que se encuentra en la parte frontal de la unidad en el lado izquierdo del **panel de control**, la **válvula de control** de flujo de agua se abre en contra del sentido de las manecillas del reloj. La pantalla del medidor de flujo de agua de enfriamiento debe cambiar de 000 a un valor positivo. Abra la **válvula de control** de flujo de agua de enfriamiento para dar aproximadamente 200 g/s. La luz indicadora del interruptor de flujo de agua de enfriamiento debe cambiar a verde, y la luz indicadora de temperatura agua de salida debe iluminarse.

Asegure que la perilla del control de temperatura de agua que se encuentra en la parte superior al final del lado derecho del **panel de control** este fijo en 80 °C o en un valor de temperatura menor (de tal forma que por ahora no tenga efecto en esta fase).

Gire la **válvula de tres vías** a la posición del tanque de combustible deseado.

Abra la **válvula aisladora de combustible** que se encuentra al frente de la unidad.

Oprima la **bomba manual** algunas veces para purgar el aire de la línea al acoplamiento de la toma de succión, y posteriormente apriete el acoplamiento con la llave inglesa de 17mm.

Coloque la compuerta de control de aire del quemador en la posición no. 4.

Apriete el botón de color verde ' 1 ' de encendido del quemador .El ventilador del quemador debe ponerse en marcha inmediatamente.

Después de un intervalo corto de tiempo la chispa de la ignición se escuchará, poco a poco apriete la **bomba manual** para ayudar al flujo de combustible, y el quemador debe encender en este punto y la **bomba manual** puede soltarse. El manómetro de la bomba indicará la presión de entrada, y la lámpara verde del quemador debe iluminarse. En caso de no detectar la flama el quemador se apagará por falla de flama.

El quemador ahora estará funcionando con normalidad, el gasto de combustible puede variarse mediante el tornillo de ajuste de presión que se encuentra situado en la bomba de combustible sobre el tubo del manómetro de presión de la bomba, a través de un rango de valores de presión de 689.5 kPa a 1 241 kPa (100 a 180 psi) aproximadamente. El tornillo será girado para aumentar la presión en el sentido de las agujas del reloj. El aire se ajusta con la compuerta de control de aire del quemador.

6.7.3 Paro de Emergencia

En cualquier momento el quemador puede ser detenido inmediatamente, apretando el botón rojo marcado con "0" de apagado que se encuentra situado en el panel de control.

Paro de la Unidad con el quemador de combustible líquido.

Al igual que en el paro de emergencia, pulse el botón rojo de apagado del quemador marcado con ' 0 ' que se encuentra situado en el **panel de control**.

Cierre la válvula de combustible.

Se recomienda cerrar la **válvula de control** de flujo de agua cuando la diferencia de temperaturas del agua de enfriamiento a la entrada y la salida sea menor a 10 °C, posteriormente se deberá cerrar la **válvula de aislamiento de agua** de la Unidad que se encuentra en la parte posterior, así como la **válvula principal** que está fuera de la unidad.

Apague el interruptor principal de la unidad que se encuentra en el **panel de control**, y el interruptor aislador de energía eléctrica que se encuentra fuera de la unidad.

Nota: Al finalizar una práctica, si desea, se puede quitar los tanques de combustible y colóquelos en su sitio de almacenamiento. Para llenado y almacenamiento de los tanques, desatornille la tapa en que se encuentra el tubo de inmersión y retire el tubo de inmersión del tanque, este puede descansar en la bandeja de goteo que se encuentra en la parte inferior de la estructura de soporte. Luego puede atornillarse la segunda tapa de cada tanque, y entonces puede almacenarse fuera de la unidad.

6.7.4 Cambio del Gasóleo a Queroseno o Viceversa

Para cambiar de combustible, simplemente gire la **válvula de tres vías** de manera que quede en la otra posición horizontal. Esto puede hacerse aún cuando el quemador esté funcionando. Suavemente apriete la bomba de cebado manual para ayudar al flujo de combustible cuando el cambio ha sido hecho, hasta que la lectura del medidor de presión de la bomba y la flama sean estables.

6.7.5 Cambio de Boquillas del Quemador

Se proporcionan dos boquillas para aprovechar el rango de fuego total del quemador, una marcada con 5.11 l/hr (1.35gal (U.S)/hr) y otro con 7.57 l/hr (2.00 gal (U.S)/hr.)

Para cambiar las boquillas se deben seguir con el proceso que se describe a continuación:

Apriete el botón rojo ' 0 ' de apagado que se encuentra situado en el panel de control, y desconecte el interruptor principal.

Asegure que la válvula aisladora de combustible esté cerrada.

Destornille el tornillo de fijación situado en la parte delantera superior del casco del quemador de combustible, (este también sostiene una grapa de cable). Levante la cubierta.

Quite la foto celda ubicada del lado derecho de la cubierta.

Usando las llaves inglesas de 10 mm y 13mm, afloje las tuercas que se encuentran en el sitio donde la tubería de combustible entra en la cubierta, del lado derecho, y desatornille la tuerca de acoplamiento de la tubería de combustible.

El ensamble interno debe estar ahora libre del enchufe exterior de la cubierta, el cable del electrodo puede permanecer conectado.

Posicione la llave hexagonal (allen) proporcionada en la caja de herramientas entre el cono y el difusor, y colóquela dentro del hexágono de la boquilla. Sujetando el final del ángulo recto del tubo de ensamble interno con una mano. Suavemente y a un ritmo constante gire la llave hexagonal de caja en contra del sentido de giro de las manecillas del reloj para destornillar el ensamble interno de la boquilla. La boquilla aflojara y entonces puede destornillarse y quitar con la mano. Se debe tener cuidado para no dañar los electrodos o el bloque de aislamiento cerámico, si desea puede quitar el cono del difusor realizando esta operación pero utilizando la llave hexagonal para aflojar.

Guarde la boquilla en su recipiente de plástico y atornille a mano la boquilla de reemplazo en el ensamble interno. Apriétese con la llave hexagonal de caja.

Invierta el procedimiento anterior, reemplazando el ensamble interno, asegurándose de que la tubería de combustible, las tuercas, la foto-celda y la tapa estén bien colocadas. El quemador puede reiniciarse entonces como lo descrito anteriormente.

6.7.6 Almacenamiento de la Unidad por un Periodo Largo

Al finalizar el semestre, la unidad tendrá que ser drenada y limpiada según el siguiente procedimiento:

Verifique que todas las válvulas de suministro se encuentren cerradas.

Utilizando las válvulas de drene que se encuentran en la parte inferior de la cámara de combustión, tanto en la parte delantera como en la trasera, drene el agua contenida en la camisa de la cámara y en el plato posterior, utilizando dichas válvulas.

Este procedimiento asegurara que la unidad se conserve por mas tiempo en optimas condiciones para su correcta operación.

CAPÍTULO 7
PRÁCTICAS REALIZABLES EN LA
CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En el presente capítulo se presentan los experimentos que se pueden realizar en la cámara de combustión C492; además, se presenta la secuencia de cálculos para cada uno de los experimentos.

SÍMBOLOS Y UNIDADES

La siguiente Tabla muestra los símbolos y las unidades utilizadas para cada uno de los cálculos que se realizan para los experimentos.

Símbolo	Cantidad	Unidad fundamental
λ	Exceso de aire	%
\dot{m}_c	Flujo másico de combustible	kg/hr
\dot{m}_a	Flujo másico de aire	kg/hr
V_c	Flujo volumétrico de combustible	m ³ /hr (gas) o l/hr (líquido)
V_a	Flujo volumétrico de aire	m ³ /hr
\dot{m}_g	Flujo másico de gases de escape	kg/hr
P.C.S.	Poder calorífico superior del combustible	kJ/kg
P.C.I.	Poder calorífico inferior del combustible	kJ/kg
Q_e	Calor de entrada	kW
Q_s	Calor de salida	kW
n_{CO}	Número de moles de Monóxido de Carbono	-----
n_f	Número de moles del Combustible	-----
M_{CO}	Peso molecular del Monóxido de Carbono	kg
M_{H_2O}	Peso molecular del vapor de Agua	kg
M_c	Peso molecular del Combustible	kg
\dot{m}_{H_2O}	Gasto másico de agua de enfriamiento	kg/s
C_p	Calor Específico	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ J/kg K

Δt	Diferencia de temperatura	K
t	Temperatura (empírica)	°C
A/C _{Masa}	Relación Aire/Combustible en base masa	Kg _{aire} /kg _{combustible}
A/C _{vol}	Relación Aire/Combustible en base Volumétrica	m ³ _{aire} /m ³ _{combustible}
w	Humedad específica del aire en la combustión	kg _{agua} /kg _{aire}
w _a	Masa de aire por kg de combustible	kg _{aire} /kg _{combustible}
h _{fg}	Entalpía de vaporización a condiciones de la temperatura de los gases de combustión	kJ/kg
h _f	Entalpía del agua saturada a condiciones de la temperatura del aire	kJ/kg
h _g	Entalpía del vapor saturado a condiciones de la temperatura del aire	kJ/kg

Presión absoluta = Presión manométrica + Presión atmosférica

Sufijos

- 1 Temperatura de entrada de agua de enfriamiento.
- 2 Temperatura de salida de agua de enfriamiento.
- 3 Temperatura de entrada de aire.
- 4 Temperatura de gases de combustión
- 5 Temperatura de flama
- c Combustible
- a Aire
- gc Gases de combustión
- H₂O Agua

DATOS ÚTILES

Combustible	Relación A/C base volumétrica (estequiométrica)	Relación A/C base masa (estequiométrica)	Máximo teórico CO ₂ (%)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Formula química
Gas natural	9.81:1	17.16:1	11.8	55.00	CH ₄
Propano	24:1	15.6:1	13.8	50.00	C ₃ H ₈
Butano	30:1	14.8:1	14.1	49.5	C ₄ H ₁₀
Queroseno	9.48:1	14.7:1	15.4	46.2	-----
Aceite Combustible	9.82:1	14.4:1	15.4	45.5	-----

10mm H₂O = 1cm H₂O = 1mbar

1ft³ = 0.02832m³

1 galón británico = 4.546 litros

1 galón americano (US) = 3.785 litros

Rango del gasto de gas:

El medidor de volumen provisto manda un impulso por cada ft³. El temporizador de gasto de gas, montado en el panel, indica los segundos entre los impulsos.

El tiempo en segundos es la lectura indicada por el temporizador:

$$\text{Gasto volumétrico} \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{hora}} \right) = \frac{3600}{\text{Tiempo}(\text{segundos})}$$

$$\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) = \frac{3600 * 0.02832}{\text{Tiempo}(\text{segundos})} = \frac{102}{\text{Tiempo}(\text{segundos})}$$

El gasto másico se obtiene del gasto volumétrico * densidad.

También

$$\frac{28.32}{\text{Gasto}_\text{másico}_\text{requerido} \left(\frac{\text{g}}{\text{s}} \right)} * \text{Densidad del gas (kg/m}^3\text{)} = \text{Tiempo (segundo)}$$

O bien

$$\frac{101.95}{\text{Gasto}_\text{másico}_\text{requerido} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)} * \text{Densidad del gas (kg/m}^3\text{)} = \text{Tiempo (segundo)}$$

Lo indicado arriba será una guía útil para establecer el gasto de gas.

7.1 EXPERIMENTOS REALIZABLES EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En la cámara de combustión se pueden realizar diversos experimentos, estos son un apoyo para la visualización del fenómeno de la combustión en sus diversos aspectos. Los experimentos, que a continuación se describen, son los más significativos:

7.1.1 Investigación de Campo de Regulación de Potencia del Quemador.

Un quemador tiene un rango de quemado (fuego bajo - fuego alto), el cual, se controla a través del combustible, y por consiguiente, por la entrada de calor; la cantidad máxima y la cantidad mínima de calor que puede suministrar el quemador se le conoce como *campo de regulación de potencia del quemador*. Para un quemador pequeño tipo paquete, como el usado en la C492, el campo de regulación típico es aproximadamente 2:1. Los quemadores del tipo industrial pueden tener un campo de regulación desde 5:1 hasta 10:1.

El procedimiento experimental para determinar el campo de regulación de potencia de un quemador es: fijar en el quemador el flujo de combustible factible más alto, y gradualmente reducir éste hasta el mínimo posible para mantener la combustión. Para cada ajuste en el combustible, el aire se debe ajustar para lograr la combustión completa del combustible, para la mayoría de los combustibles, el CO_2 estará en un rango del 10% al 12%, sin embargo, tanto el exceso de aire como el CO_2 podrían variar por encima del campo de regulación.

7.1.2 Investigación de la Relación Aire / Combustible y Condición Estequiométrica.

Como ya se vio en el capítulo 2, cualquier combustible de hidrocarburo tiene una condición de combustión estequiométrica en la que todo el oxígeno en el aire se consume. La proporción de aire / combustible estequiométrica es diferente para cada combustible; esta, depende de su composición química. Una tabla con las condiciones estequiométrica para masa y volumen para combustibles típicos se proporciona en la pag. 122.

El procedimiento experimental consiste en colocar el quemador en un rango medio de flujo de combustible (rango medio de quemado), el cual permanecerá constante a lo largo de la prueba; posteriormente, se varía la cantidad de aire suministrado a lo largo del rango posible, para lograr la combustión estequiométrica.

7.1.3 Comparación del Análisis Teórico y Práctico de los Gases Producto de la Combustión.

Para realizar este experimento se requerirá de un analizador de gases de combustión que pueda determinar también la cantidad de monóxido de carbono presente en los gases, usando el analizador de gases de escape estándar, se puede realizar de igual manera el experimento, pero con algunas limitantes.

Para realizar este experimento, se necesitará conocer la composición química del combustible a quemar. Realizando el balance estequiométrico en relación a la composición química del combustible, se determina la condición estequiométrica teórica, ya sea en base masa o base volumétrica. Posteriormente, se calcula la composición de los gases producto de la combustión en un rango de 40% de exceso de aire a 40% de deficiencia de aire para la condición estequiométrica.

7.1.4 Comparación de Dos Combustibles Líquidos.

El quemador para combustibles líquidos de la C492 normalmente operará con combustible Diesel o Petróleo Diáfano. Su composición química es similar, y de hecho, la mayoría de los analizadores de gases de la combustión los manejan bajo una sola clasificación de "Aceite Combustible Ligero". Bajo este supuesto, se puede utilizar un analizador de gases para el experimento. El experimento entonces consistirá en medir y cuantificar las diferencias de las temperaturas, los gastos de combustible y los análisis de los productos de la combustión.

7.1.5 Comparación de Dos Combustibles Gaseosos.

El quemador de gas de la C492 opera con gas natural (Metano) o con gas LP (Propano / Butano), teniendo cuidado de que se utilice la boquilla y la apropiada configuración de la válvula multiblock. El método para cambiar de un modo a otro puede encontrarse en la sección del procedimiento de operación para tal situación.

NOTA DE SEGURIDAD: sería sumamente peligroso usar la boquilla o la configuración de la válvula multiblock inadecuada para el tipo de gas que se está utilizando en el quemador de gas.

El gas natural y el gas LP tienen características considerablemente diferentes, y quemando cada uno y analizando los resultados, es posible tener una apreciación real de sus diferencias.

7.1.6 Balance de Calor.

Un balance de calor proporciona una manera útil de determinar la eficiencia de la cámara. La instrumentación del equipo permite realizar un balance de calor simple, ya sea con el quemador de combustibles líquidos o con el quemador para combustibles gaseosos.

7.1.6.1 Balance de Energía.

Para realizar un análisis termodinámico en la cámara de combustión, el balance de calor resulta incompleto. Por consiguiente un balance de energía sería una manera más completa de evaluar el funcionamiento de la unidad, en lugar de un balance de calor.

La experimentación consiste en crear y mantener condiciones estables en la cámara de combustión, para así poder aplicar una ecuación de flujo de energía constante. En efecto, esto significa la representación del balance de energía, calculando en esta la energía ganada, las pérdidas por el aire y velocidades de los gases de escape, la energía potencial debido a la altura de la succión y salida, etc.

Se toman las lecturas bajo las condiciones empleadas para el balance de energía.

Un balance de energía es bastante satisfactorio en muchas circunstancias industriales exceptuando aquellos como una turbina de gas donde la energía de velocidad es muy importante.

7.2 EXPERIMENTOS UTILIZANDO EL QUEMADOR PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS.

Los experimentos que se describen a continuación, son aquellos que se realizan utilizando el quemador para combustibles gaseosos. Se proponen teniendo en cuenta que el quemador que está instalado en la cámara de combustión es el quemador para combustibles gaseosos. En caso de que se tenga instalado el quemador de combustibles líquidos se deberá cambiar por el quemador de combustibles gaseosos.

7.2.1 Investigación del Campo de Regulación de Potencia del Quemador.

1. Inicie el quemador de gas encendiéndolo como lo descrito en el procedimiento de operación.
2. Regule la presión de salida de gas al nivel máximo disponible, esto es, aproximadamente 6 kPa de presión.
3. Ajuste la compuerta del aire en una posición para obtener una buena combustión.
4. Ajuste el flujo de agua de enfriamiento para dar una temperatura de salida (T_2) entre 60 y 80°C.
5. Permita estabilizar las condiciones, y registre las lecturas en la hoja de Observación de Gas.
6. Reduzca la presión de gas una pequeña cantidad, y el flujo de agua de enfriamiento cuando sea necesario.

De nuevo permita estabilizar las condiciones, y registre las lecturas.

Continúe reduciendo el flujo de gas en etapas, mientras ajusta la compuerta del control de aire y el flujo de agua de enfriamiento cuando sea necesario, hasta que el fuego mínimo sea alcanzado.

Apague lentamente el quemador como lo descrito en el procedimiento de operación.

Procese las lecturas como se indica en la hoja de resultados.

Estas lecturas tienen los valores de CO que se obtienen usando un analizador de gases adicional o de manera teórica conociendo la composición química del combustible. Los valores de O_2 y los valores del CO_2 se obtienen de un analizador de gases estándar (tipo Orsat).

Se observa que el rango de regulación es aproximadamente 1.5:1 para este quemador. (110 kW a 85 kW para este ejemplo).

Nota: Los resultados a partir del calor suministrado se emplean para el balance de energía utilizado en el inciso 7.2.5

C492 OBSERVACIONES

Día: 26-Ago-03
 Quemador: NGL3

Combustible: Gas L.P.
 Densidad Relativa: 1.8
 Relación Estequiométrica A/C (vol): 24
 Relación Estequiométrica A/C (masa): 15.6
 Temperatura Ambiente [°C]: 24
 Presión Ambiente [kPa]: 78.5

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Presión del Gas [mbar]	48	46	38	36	34	29
Apertura de la compuerta del ventilador	3	2	2	1	1	0
Tiempo de consumo del gas [s]	23	24	26	27	28	30
Gasto del agua de enfriamiento [g/s]	250	248	215	215	210	211
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada [°C]	17	17	16	17	17	17
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida [°C]	68	68	70	69	66	67
Temperatura del aire a la entrada [°C]	23	23	23	22	22	21
Temperatura de los gases producto de la combustión [°C]	824	827	781	781	770	759
Lectura de O2 [%]	3.5	3.0	5.5	6.5	6.0	4.0
Lectura de CO2 [%]	10.0	12.0	8.5	9.0	9.0	10.0
Lectura de CO [%]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Exceso de aire [%]	20.1	16.8	35.7	45.1	40.3	23.7
Temperatura de la flama [°C]	1079	1081	1054	1062	1055	1056

C492 RESULTADOS:	GAS	Combustible:	Gas LP
Día:	26-Jun-03	Densidaden kg/m3	1.8
Quemador:	NGL3	Relacion Estequiometrica A/C (vol)	24
ϕ [%]	80	Relacion Estequiometrica A/C (masa)	15.6
hf @ Tcomb [kJ/kg]	100	Temperatura Ambiente [°C]	24
hg @ Tcomb [kJ/kg]	2545	Presion Ambiente [kPa]	78.5
		ω [kgH2O/kg _a]	0.015

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Gasto de combustible (m3/hr)	4.43	4.25	3.92	3.78	3.64	3.40
Relación Aire / Combustible (base Vol)	28.83	28.02	32.57	34.83	33.66	29.68
Gasto de aire (base Vol)	127.84	119.09	127.78	131.59	122.63	100.91
Gasto de combustible en base masa. [kg/hr]	7.98	7.65	7.06	6.80	6.56	6.12
Relación Aire / Combustible (base masa)	18.74	18.21	21.17	22.64	21.88	19.29
Gasto de aire (base masa)	149.58	139.34	149.50	153.96	143.48	118.07
Calor Suministrado "Qe" [kW]	110.87	106.25	98.08	94.44	91.07	85.00
Calor Sensible "a" [kW]	38.05	35.73	35.81	36.87	33.98	27.85
Combustible no quemado "b" [kW]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entalpia del vapor de agua a la temperatura de los G. C.	4215.00	4222.00	4114.00	4114.00	4089.00	4064.00
Calor en el vapor de agua "c" [kW]	5.80	5.57	5.01	4.82	4.62	4.28
Calor total en los gases de escape "d" (a+b+c) [kW]	43.85	41.30	40.82	41.69	38.60	32.13
Calor absorbido por el agua de enfriamiento "e" [kW]	53.37	52.94	48.60	46.80	43.07	44.16
Calor que sale "Qs" (d+e) [kW]	97.23	94.25	89.42	88.49	81.68	76.30
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	0.12	0.11	0.09	0.06	0.10	0.10

7.2.1.1 Ejemplo de Cálculos para las Lecturas del Gas LP - Prueba No. 4

$$\text{Flujo de gas} = \frac{102}{\text{tiempo(seg)}} = \frac{102}{27} = 3.78 \frac{m^3}{hr} \quad (\text{volumen})$$

(De los datos de la pag 123)

Porcentaje de Aire / Combustible (A/C) (volumen)

Relación estequiométrica A/C en base Volumétrica = 24:1 (de la pag 122)

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de exceso de aire } (\lambda) &= \left[\left(\frac{20.9}{20.9 - O_2} \right) - 1 \right] 100 = \left[\left(\frac{20.9}{20.9 - 6.5} \right) - 1 \right] 100 \\ &= 45.1 \end{aligned}$$

$$\text{Relación Aire / Combustible} = (\text{Relación estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) = 24 \left(\frac{45.1}{100} + 1 \right)$$

$$\therefore (24)(1.451) = 34.83:1$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de aire volumétrico} &= (\text{Flujo de Gas (volumétrico)})(A/C \text{ vol}) \quad (\text{En volumen}) \\ &= \left(3.78 \frac{m^3}{hr} \right) (34.83) \\ &= 131.59 \frac{m^3}{hr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de gas másico} &= \text{Flujo de Gas (volumétrico)} (\text{La densidad del Combustible}) \quad [\text{En masa}] \\ &= \left(3.78 \frac{m^3}{hr} \right) \left(1.8 \frac{kg}{m^3} \right) \\ &= 6.80 \frac{kg}{hr} \end{aligned}$$

Relación Aire / Combustible (En masa)

Relación estequiométrica A/C en base masa = 15.6:1

$$\begin{aligned} \text{Relación Aire / Combustible} &= (\text{Relación estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) \\ &= 15.6 \times 1.451 = 22.64:1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de aire} &= (\text{flujo de gas}) (A/C \text{ (masa)}) \\ &= \left(6.80 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) (22.64) \\ &= 153.96 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor de entrada} &= (\text{Flujo de gas en base masa}) (\text{Poder Calorífico Superior del combustible}) \\ &= \left(6.80 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(50\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1}{3600} \frac{\text{hr}}{\text{s}} \right) \\ &= \left(340\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \right) \left(\frac{1}{3600} \frac{\text{hr}}{\text{s}} \right) \\ &= 94.44 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\ &= 94.44 \text{ kW} \end{aligned}$$

7.2.2 Investigación de la Relación Aire / Combustible y la Condición Estequiométrica

1. Inicie el quemador de gas que enciende como lo descrito en el procedimiento de operación.
2. Regule la presión de salida de gas, medida en el manómetro diferencial, en un nivel en el cual se pueda variar las proporciones de aire / combustible, ésta es aproximadamente 2.5 kPa, mantenga ésta constante a lo largo del experimento.
3. Ajuste el flujo de agua de enfriamiento para obtener una temperatura de salida de agua (T_2) entre 60 y 80°C, conserve el flujo constante a lo largo del experimento
4. Ajuste la compuerta de entrada de aire (damper) en la posición mínima que pueda mantener la combustión.
5. Permita que las condiciones se estabilicen y anote los resultados observados en la hoja de observación.
6. Aumente el flujo de aire con el control de compuerta cambiando la posición una graduación.
7. De nuevo permita que las condiciones se estabilicen y registre las lecturas.
8. Continúe aumentando el flujo de aire en fases, hasta que el control de aire este colocado en la máxima posición o la combustión no pueda sostenerse.
9. Apague el quemador como lo descrito en el procedimiento de operación.
10. Procese las lecturas como se indica en las hojas de resultados.

Los valores de O_2 y de CO_2 se obtienen utilizando el analizador de aire estándar.

Los secuencia de cálculos es igual que para el Experimento 7.2.1.1

C492 OBSERVACIONES

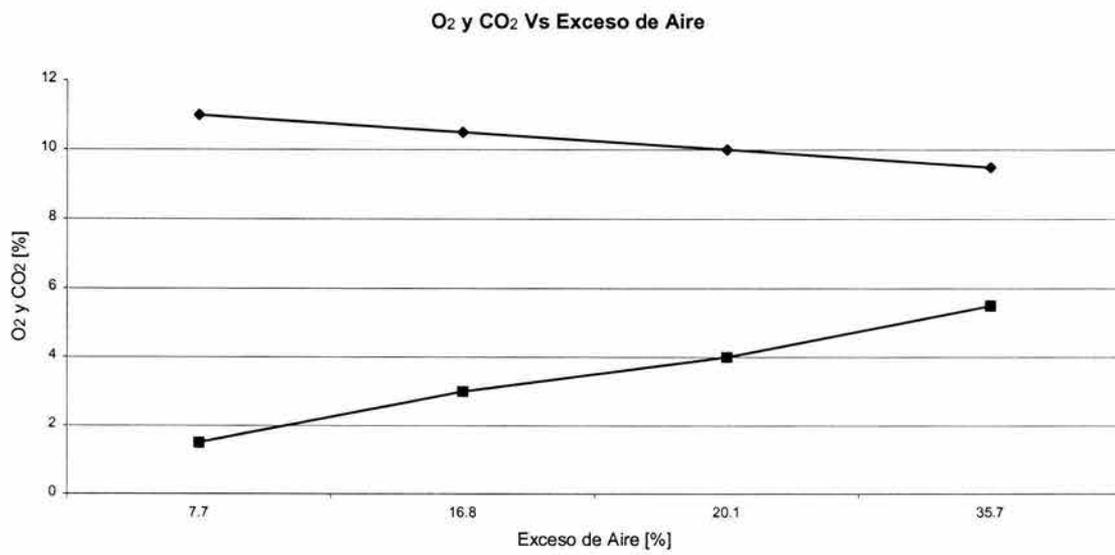
Día: 26-Ago-03
 Quemador: NGL3

Combustible: Gas L.P.
 Densidad Relativa: 1.8
 Relación Estequiométrica A/C (vol): 24
 Relación Estequiométrica A/C (masa): 15.6
 Temperatura Ambiente [°C]: 24
 Presión Ambiente [kPa]: 78.5

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Presión del Gas [mbar]	42	42	42	42		
Apertura de la compuerta del ventilador	3	2	1	0		
Tiempo de consumo del gas [s]	25	25	25	24		
Gasto del agua de enfriamiento [g/s]	213	213	249	247		
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada [°C]	17	17	17	17		
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida [°C]	71	70	66	67		
Temperatura del aire a la entrada [°C]	23	23	23	23		
Temperatura de los gases producto de la combustión [°C]	794	806	814	813		
Lectura de O2 [%]	5.5	4.0	3.0	1.5		
Lectura de CO2 [%]	9.5	10.0	10.5	11.0		
Lectura de CO [%]	0.5	0.0	0.0	0.0		
Exceso de aire [%]	35.7	23.7	16.8	7.7		
Temperatura de la flama [°C]	1070	1072	1075	1078		

C492 RESULTADOS:	GAS	Combustible:	Gas LP
Día:	26-Jun-03	Densidaden kg/m3	1.8
Quemador:	NGL3	Relacion Estequiometrica A/C (vol)	24
ϕ [%]	80	Relacion Estequiometrica A/C (masa)	15.6
hf @ Tcomb [kJ/kg]	100	Temperatura Ambiente [°C]	24
hg @ Tcomb [kJ/kg]	2545	Presion Ambiente [kPa]	78.5
		ω [kgH2O/kg]	0.015

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Gasto de combustible (m3/hr)	4.08	4.08	4.08	4.25		
Relación Aire / Combustible (base Vol)	32.57	29.68	28.02	25.86		
Gasto de aire (base Vol)	132.89	121.10	114.33	109.89		
Gasto de combustible en base masa. [kg/hr]	7.34	7.34	7.34	7.65		
Relación Aire / Combustible (base masa)	21.17	19.29	18.21	16.81		
Gasto de aire (base masa)	155.48	141.68	133.77	128.57		
Calor Suministrado "Qe" [kW]	102.00	102.00	102.00	106.25		
Calor Sensible "a" [kW]	40.36	37.51	35.88	34.64		
Combustible no quemado "b" [kW]	0.92	0.00	0.00	0.00		
Entalpia del vapor de agua a la temperatura de los G. C.	4144.00	4172.00	4191.00	4189.00		
Calor en el vapor de agua "c" [kW]	5.25	5.28	5.31	5.53		
Calor total en los gases de escape "d" (a+b+c) [kW]	46.53	42.80	41.19	40.16		
Calor absorbido por el agua de enfriamiento "e" [kW]	48.15	47.26	51.07	51.70		
Calor que sale "Qs" (d+e) [kW]	94.68	90.05	92.26	91.86		
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	0.07	0.12	0.10	0.14		



De la tabla de datos y resultados para gas L.P.

7.2.3 Comparación del Análisis Teórico y Práctico de los Gases Producto de la Combustión.

La unidad se opera de la misma manera que en el inciso 7.2.2, y utilizando los valores obtenidos en éste podemos derivar nuevos resultados comparando lo teórico con lo práctico. La tabla 7.1 muestra la diferencia entre la relación aire / combustible en base masa determinado teóricamente y aquellos derivados de la prueba para la investigación de la relación Aire / Combustible y la condición estequiométrica del Quemador de Gas utilizando como combustible Gas LP.

Tabla 7.1

Exceso de aire (%)	Estequiométrica	10.00	20.00	30.00	40.00
Relación Aire/Combustible Teórica	15.6	17.16	18.72	20.28	21.84
Exceso de Aire (%)	Estequiométrico	7.7	16.8	23.7	35.7
Relación Aire/Combustible Real	15.76	16.97	18.38	19.45	21.14

Se muestra la similitud entre el análisis de los gases producto de la combustión teórica y real gráficamente en las páginas siguientes. Esto verifica que el análisis de los gases de la combustión realizado en la práctica son muy similares con los cálculos teóricos, y es la única manera confiable de saber el estado de la combustión en la práctica.

7.2.3.1 Ejemplo de Cálculos para las Lecturas del Gas LP

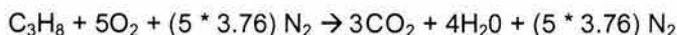
Para determinar la relación Aire / Combustible teórica utilizamos la ecuación del propano por ser la más aproximada para la composición del Gas LP:

Para el propano la ecuación de combustión a la condición estequiométrica es:



Esto es para oxígeno puro, pero cuando se usa el aire atmosférico como fuente de oxígeno este contiene 21% O_2 79% N_2 , entonces es usada la relación $\frac{79}{21} = 3.76$ moles de N_2 para cada mol de O_2 .

Así, para el propano la ecuación se transforma:



$$\text{Peso molecular del combustible: } \text{C}_3\text{H}_8 = (12)(3) + (1)(8) = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{mol}}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso molecular del aire} &= (5)(\text{O}_2) + (5)(3.76)\text{N}_2 \\ &= (5)(16)(2) + 3.76(14)(10) \\ &= 686.4 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{mol}} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{Relación estequiométrica Aire / Combustible} = \frac{686.4}{44} = 15.6 : 1 \text{ para base masa}$$

A cualquier condición.

$$\text{Relación Aire / Combustible} = (\text{Relación Estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right)$$

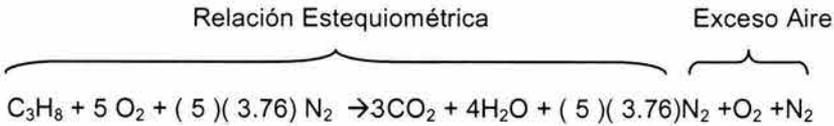
\therefore A 10% de exceso de aire.

$$\begin{aligned} &= 10\% \text{ Relación Aire / Combustible} = (15.6) \left(\frac{10}{100} + 1 \right) \\ &= (15.6)(1.1) \\ &= 17.16:1 \end{aligned}$$

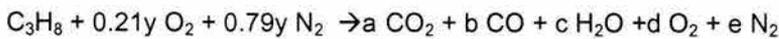
Los cálculos son similares para calcular 20%, 30%, 40% y 50% de exceso de aire los resultados se muestran en la tabla 7.1

Para realizar los análisis de las proporciones de Aire / Combustible reales se utilizan las lecturas que se obtuvieron, para Prueba 3 $\lambda = 16.8\%$

La ecuación de la combustión con aire en exceso:



Para cada kg_{mol} de combustible.



Balance de Carbono $3 = a + b$ como $b = 0$; $a = 3$

Balance de Oxígeno $0.21y = a + \frac{b}{2} + \frac{c}{2} + d$

Balance de Hidrógeno $8 = 2c$ $\therefore c=4$

Balance de Nitrógeno $0.79y = e$

De las lecturas de los gases producto de la combustión :

$$a = \% CO_2 = 10.5$$

$$b = \% CO = 0$$

$$d = \% O_2 = 3.0$$

$$\frac{a}{d} = \frac{10.5}{3.0} \quad \therefore \quad a = 3.5 d$$

como $a = 3$ $\therefore \quad d = \frac{3}{3.5} = 0.857$

Sustituyendo lo anterior en el balance de oxígeno

$$0.21y = 3 + \frac{0}{2} + \frac{4}{2} + 0.857$$

$$\therefore \quad y = \frac{5.857}{0.21} = 27.89$$

\therefore Cada kg_{mol} de combustible tiene 27.89 kg_{mol} de aire.

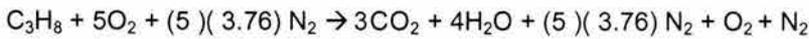
$$\begin{aligned} \text{Relación Aire / Combustible para base masa} &= \left(\frac{\eta_{aire}}{\eta_{combustible}} \right) \left(\frac{M_{aire}}{M_{combustible}} \right) \\ &= \left(\frac{27.89}{1} \right) \left(\frac{0.21O_2 + 0.79N_2}{C_3H_8} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Relación Aire / Combustible para base masa} &= \left(\frac{27.89}{1} \right) \left(\frac{(0.21)(32) + (0.79)(28)}{(12)(3) + (1)(8)} \right) \\
 &= \frac{(27.89)(29)}{(1)((12)(3) + (1)(8))} \\
 &= 18.38:1
 \end{aligned}$$

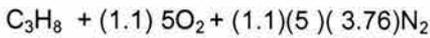
Las otras relaciones de Aire / Combustible reales mostradas en la tabla 7.1 son calculadas de forma similar.

Los productos de la combustión teóricos se derivan como sigue:

Para el propano la ecuación de combustión con exceso aire es:



Así para $\lambda = 10\%$ de exceso de aire esta se transforma.



Es decir $(1.1)(5.0) = 5.5 O_2$ que se utilizan en lugar del oxígeno estequiométrico que es $5 O_2$

$$\therefore O_2 \text{ extra en los gases de la combustión} = 0.5$$

De igual manera $(1.1)(5)(3.76) = 20.68 N_2$ que se utiliza en lugar del estequiométrico que es $18.8 N_2$

De estos datos, pueden determinarse los siguientes valores para un exceso de aire del 10%:

Tabla 7.2

Producto	kg _{mol}	%vol	%vol seco
CO ₂	3	3	12.40
N ₂	1.1 * 18.8	20.68	85.53
H ₂ O	-	-	-
O ₂	(1.1)(5.0)	0.5	20.7
CO	0	0	0
		24.18	100

-por ser análisis en base seco

-No se registró el monóxido de carbono

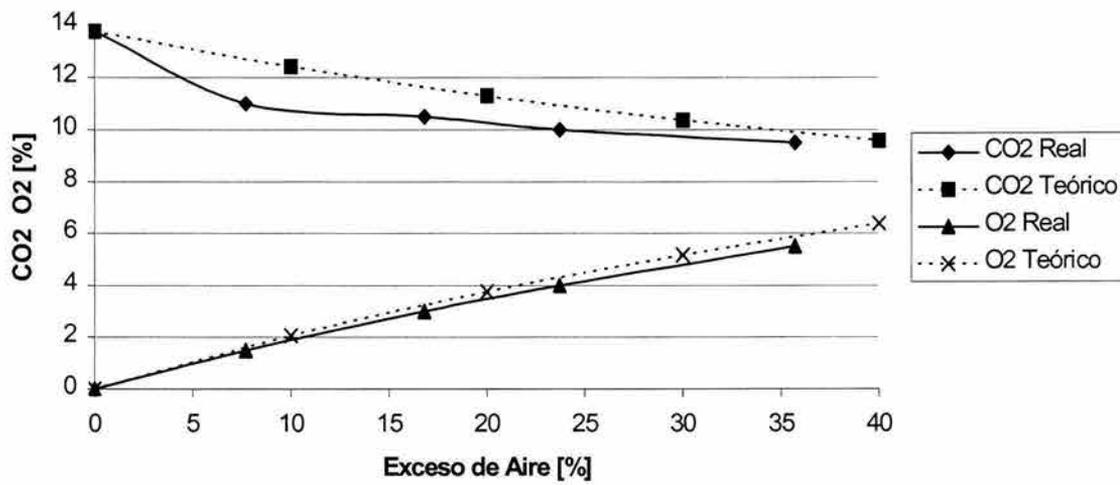
Los valores para los gases productos de la combustión para el análisis estequiométrico, hasta 40% de exceso de aire son:

Tabla 7.3

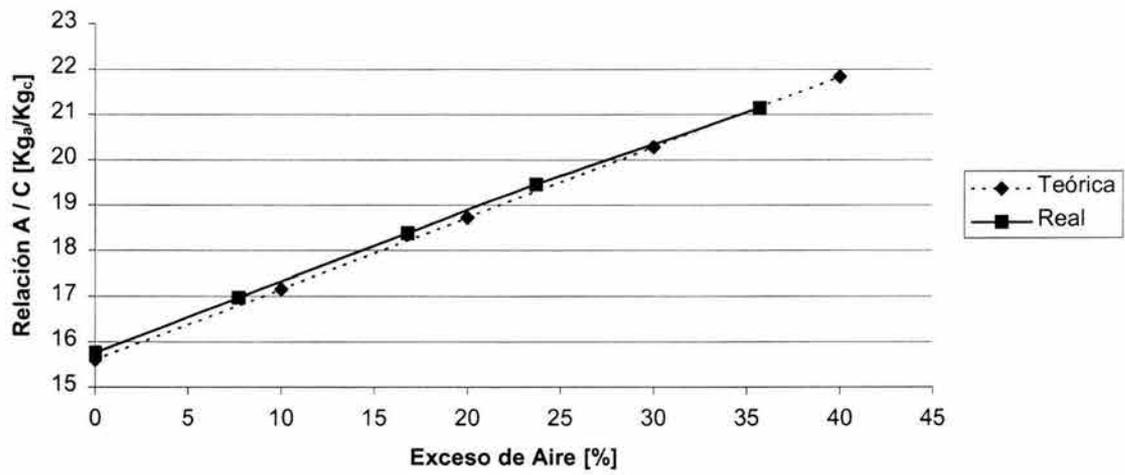
Exceso de aire estequiométrico			10%		20%		30%		40%	
El producto	Vol	% Vol								
CO ₂	3	13.76	3	12.4	3	11.3	3	10.4	3	9.58
N ₂	19	86.24	21	85.5	23	84.9	24	84.5	26	84.04
H ₂ O	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
O ₂	0	0	0.5	2.07	1	3.76	1.5	5.18	2	6.38
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	100%	24	100%	27	100%	29	100%	31	100%

A continuación se muestran estos resultados de forma gráfica.

Comparación Teórica y Real de los Gases producto de la Combustión



Comparación de la relación Aire / Combustible Teórica y Real



7.2.4 Comparación de Dos Combustibles Gaseosos

El procedimiento experimental consiste en operar el quemador en condiciones moderadas y ajustar la proporción de Aire / Combustible a través del un rango disponible, igual como en el experimento 7.2.1.

Para comparar dos tipos de combustibles gaseosos, una técnica muy útil, será calcular el calor de entrada bajo condiciones ideales para ambos gases. Esto implica conocer el poder calorífico neto o superior de los combustibles que serán probados.

Debido a que en la actualidad no se cuenta con una línea para suministrar gas natural al quemador, solo se explica dicho procedimiento.

7.2.5 Balance de Calor

El procedimiento experimental es operar el quemador en una condición de suministro de combustible moderada y ajustar la compuerta de control de aire (damper) para dar un pequeño aumento en el exceso de aire, es decir justo por encima de la condición estequiométrica.

Ajuste el flujo de agua de enfriamiento para tener una temperatura de salida de agua de enfriamiento (T_2) cercana a los 80 [°C], teniendo cuidado de no provocar una alta temperatura de salida de agua de enfriamiento que ocasione un paro de emergencia de la unidad.

Permita que las condiciones se establezcan y tome el registro de las lecturas como se muestra en la hoja de observación, y realice los cálculos como se muestra en la hoja de resultados; complete la hoja de resultados. El valor del poder calorífico del combustible se necesitará, para calcular el calor de entrada.

El efecto del porcentaje de Aire / Combustible en las pérdidas de calor puede ser calculado usando los resultados obtenidos para el experimento 7.2.2

Los resultados para las pérdidas de calor cuando se quema propano fuera del rango de porcentaje de Aire / Combustible se muestra gráficamente. Puede observarse que cuando el porcentaje de Aire / Combustible se aumenta el calor que se pierde en los gases de la combustión también aumenta, y el calor que se transfiere al agua disminuye. Para la operación óptima como un Generador de Vapor el quemador se pondrá por encima de la relación estequiométrica, es decir aproximadamente 10 - 20% de exceso de aire, para obtener un rendimiento en entrega de calor, y asegurar una combustión completa.

7.2.5.1 Ejemplo de Cálculos del Balance de Calor

Para estos cálculos se utilizan los resultados del Gas LP obtenidos en el experimento 7.2.2. Prueba No.4

Calor de entrada = (Flujo másico de gas) (Poder Calorífico Superior del combustible)

$$\begin{aligned}
 &= (7.65 \frac{kg}{hr}) (50\,000 \frac{kJ}{kg}) \\
 &= \left(\frac{7.65 \left[\frac{kg}{s} \right]}{3600} \right) \left(50000 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \\
 &= \underline{106.25 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Salidas de calor = Calor en los gases de escape + calor retirado por el agua de enfriamiento + Pérdidas incalculables

El Calor en los gases de escape se compone de tres partes:

- a.- Calor sensible
- b.- Pérdidas por el combustible no quemado.
- c.- Pérdidas en el vapor de agua (Calor Latente). (Formadas por la combustión del hidrógeno, por la humedad en el aire y por la humedad en el combustible)

a. Calor Sensible

$$= \left(\dot{m}_g \right) \left(C_{p_g} \right) \left(\Delta t_g \right);$$

donde: \dot{m}_g Flujo másico de gases producto de la combustión.

C_p Capacidad Térmica específica a presión constante de los gases producto de la combustión.

Δt_g Incremento de temperatura entre el aire de entrada y la temperatura de los gases producto de la combustión.

$$\begin{aligned}
 &= \left(\dot{m}_a + \dot{m}_c \right) (1.15) (t_s - t_e) \\
 &= \left[\left(\frac{A}{C_{masa}} + 1 \right) \dot{m}_c \right] (1.15) (t_4 - t_3) \\
 &= [(15.6 + 1)(7.65)] (1.15) (813 - 23) \\
 &= \left(124704 \left[\frac{kJ}{hr} \right] \right) \left(\frac{1}{3600} \left[\frac{hr}{s} \right] \right) \\
 &= 34.64 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

b. Pérdidas por el Combustible No Quemado

$$= (10\ 143\ C\ [CO/(CO_2 + CO)])\ \dot{m}_c$$

- Donde
- C = La masa de carbono no quemado por kg de combustible
 - CO₂ = % en los gases de escape en base volumétrica
 - CO = % en el gases de escape en base volumétrica

$$= (10143) \left(\frac{36}{44} \right) \left[\frac{\left(\frac{(0)(100)}{(1)(10^6)} \right)}{\left[(12)(32) + \left(\frac{(0)(100)}{(1)(10^6)} \right) \right]} \right] \quad (6.8)$$

$$= 0.0 \text{ kJ/s}$$

$$= \underline{0.0} \text{ W}$$

c. Pérdidas en el Vapor de Agua

= Pérdida de calor en vapor de agua de productos + Pérdida de calor en vapor de agua en aire

$$= m_c \left(\left(\frac{9H_2}{100} \right) (h_{ig} - h_{fa}) \right) + \left[(w)(A/C_{masa})(h_{ig} - h_{gia}) \right]$$

Donde: H_2 = Hidrógeno en el combustible en %.

Para el Propano $C_3 H_8$ el peso molecular del combustible

$$= (3)(12) + (4)(2) = 44 \frac{kg}{kg_{mol}}$$

= Hidrógeno H_2 en el Propano = 8

$$\therefore = \frac{8}{44} = 0.1818 = 18.18\%$$

w = Humedad específica del aire de la combustión obtenida de la carta psicrométrica @ 23°C y 50% ϕ

$$= 0.015 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire\ seco}}$$

A/C_{masa} = Masa de aire por kg de combustible.

$$= 15.6 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$$

h_{ig} = Entalpía de vapor sobrecalentado a la temperatura de los gases de producto de la combustión

$$= 4189 \frac{kJ}{kg} @ 813^\circ C$$

h_{fa} = Entalpía del agua saturada a la temperatura del aire

$$= 100.0 \frac{kJ}{kg} @ 23^\circ C.$$

h_{gta} = Entalpía del vapor saturado a la temperatura del aire de combustión.

$$= 2545 \frac{kJ}{kg} @ 23^{\circ}C$$

$$= (7.17)(10^{-4}) \left[\left(\frac{(9)(18.18)}{100} \right) (4189 - 100) \right] + [(0.015)(15.6)(4189 - 2545)]$$

$$= \underline{5.1} \text{ kW}$$

Calor total en el flujo = a + b + c

$$= 34.64 + 0 + 5.1$$

$$= \underline{39.74} \text{ kW}$$

i. Calor que se pierde en el agua de enfriamiento

$$= (m_{H_2O})(C_{p_{H_2O}})(\Delta t)$$

$$= \left(247 \frac{g}{s} \right) \left(\frac{1}{1000} \frac{g}{kg} \right) \left(4.182 \frac{kJ}{kgK} \right) ((t_2 - t_1)K)$$

$$= (0.247)(4.182)(67 - 17)$$

$$= \underline{51.7} \text{ kW}$$

ii. Calor que sale

$$= \text{Calor en los gases de escape} + \text{Calor en el agua de enfriamiento}$$

$$= 40.2 + 51.7$$

$$= \underline{91.86} \text{ kW}$$

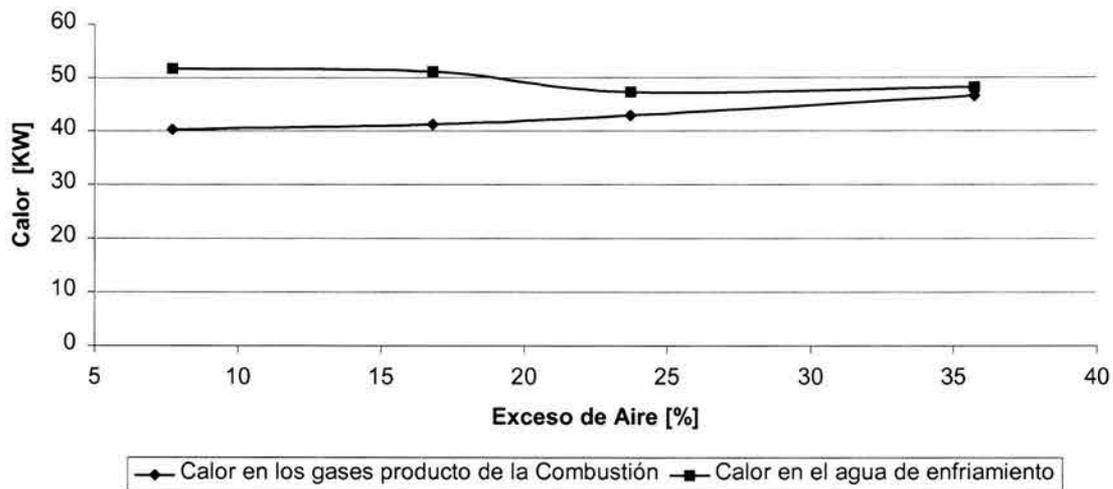
iii. Diferencia (Pérdidas)

$$= \frac{\text{Calor de Entrada} - \text{Calor que Sale}}{\text{Calor de entrada}}$$

$$= \frac{106.25 - 91.86}{91.86}$$

$$= 0.135\%$$

Distribución de Calor vs Exceso de Aire



7.3 EXPERIMENTOS UTILIZANDO EL QUEMADOR PARA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.

Los experimentos que se describen a continuación, son aquellos que se pueden realizar utilizando el quemador para combustibles líquidos. Se proponen teniendo en cuenta que el quemador que está instalado en la cámara de combustión es el quemador para combustibles líquidos. En caso de que se tenga instalado el quemador de combustibles gaseosos se deberá cambiar por el quemador de combustibles líquidos.

7.3.1 Investigación del Campo de Regulación de Potencia del Quemador.

Asegúrese que la boquilla de 1.35 gal/hr americanos esta colocada.

1. Inicie el quemador de combustible líquido que enciende como lo descrito en el procedimiento de operación.
2. Aumente la presión de la bomba de combustible al máximo posible (160 - 180 psi, 1100 – 1250 kPa), esto genera aproximadamente 100 kW de calor de entrada.
3. Ajuste el control de mando de aire en una posición que dé una buena combustión; probablemente al iniciar esté en la posición totalmente abierta.
4. Ajuste el flujo de agua de enfriamiento para obtener una temperatura de salida del agua de enfriamiento (T_2) entre 60 y 80 °C.
5. Permita que las condiciones se estabilicen, registre las lecturas en la hoja de observación para aceites combustibles.
6. Reduzca la presión de bomba de combustible aproximadamente 20 psi (o 100 kPa), ajustando la compuerta de aire y el flujo de agua de enfriamiento cuando sea necesario.

De nuevo permita que las condiciones se estabilicen, y registre las lecturas.

Continúe reduciendo el flujo de combustible en etapas, mientras ajusta la compuerta de aire y el flujo de agua de enfriamiento cuando sea necesario, hasta que la flama ya no se mantenga (aproximadamente el 100 psi, 700 kPa para esta boquilla).

Apague el quemador como descrito en el Procedimiento de operación.

Procese las lecturas como en la hoja de los resultados dada.

Las pruebas muestran que para el uso de la boquilla de 1.35 gal / hr, el campo de regulación de potencia es aproximadamente 1.25:1 para este quemador. (76 kW a 60 kW en este ejemplo).

C492 OBSERVACIONES:		Combustible:	Diesel
Día:	26-Jun-03	Densidad Relativa:	0.85
Quemador:	NOL3	Relacion Estequiometrica A/C (vol)	9.82
Boquilla:	1.35 (Usgal/hr)	Relacion Estequiometrica A/C (masa)	14.4
		Temperatura Ambiente [°C]	24
		Presion Ambiente [kPa]	78.3

Prueba No.	Boquilla de 1.35 Usgal/hr				
	1	2	3	4	5
Presion de la bomba [psi]	180	160	140	120	100
Apertura de la compuerta del ventilador	3	2.5	2.5	2.5	2.5
Colocación del difusor	3	3	3	3	3
Lectura del gasto de combustible [L/hr]	7.14	6.87	6.5	6.07	5.585
Gasto del agua de enfriamiento [g/s]	213	213	213	213	213
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada [°C]	18	18	18	17	17
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida [°C]	72	71	70	69	66
Temperatura del aire a la entrada [°C]	23	24	24	24	24
Temperatura de los gases producto de la combustión [°C]	722	710	702	687	651
Lectura de O2 [%]	3.0	3.5	3.5	4.5	6.5
Lectura de CO2 [%]	13.0	13.0	13.5	11.0	10.5
Lectura de CO [%]	0	0	0	0	0
Exceso de aire [%]	16.76	20.11	20.11	27.44	45.14
Temperatura de la flama [°C]	930	1046	1010	1010	986

C492 RESULTADOS:

Dia: 26-Jun-03
 Quemador: NOL3
 Boquilla: 1.35 (Usgal/hr)
 hf @ Tcomb [kJ/kg] 100
 hg @ Tcomb [kJ/kg] 2545
 φ [%] 80

Combustible: Diesel
 Densidad Relativa: 0.85
 Relacion Estequiometrica A/C (vol) 9.82
 Relacion Estequiometrica A/C (masa) 14.4
 Temperatura Ambiente [°C] 24
 Presion Ambiente [kPa] 78.3
 ω [kgw/kga] 0.015

Prueba No.	Boquilla de 1.35 Usgal/hr					
	1	2	3	4	5	6
Gasto de combustible corregido (L/hr)	7.14	6.87	6.5	6.07	5.59	
Relación Aire / Combustible (base Vol)	11.47	11.80	11.80	12.51	14.25	
Gasto de aire (base Vol)	81.87	81.03	76.67	75.96	79.60	
Gasto de combustible en base masa. [kg/hr]	6.07	5.84	5.53	5.16	4.75	
Relación Aire / Combustible (base masa)	16.81	17.30	17.30	18.35	20.90	
Gasto de aire (base masa)	102.04	101.00	95.56	94.68	99.22	
Calor Suministrado "Qe" [kW]	76.71	73.80	69.83	65.21	60.00	
Calor Sensible "a" [kW]	24.14	23.41	21.89	21.15	20.82	
Combustible no quemado "b" [kW]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Entalpia del vapor de agua a la temperatura de los G. C.	3979.0	3951.0	3932.0	3899.0	3818.0	
Calor en el vapor de agua "c" [kW]	4.2	4.0	3.7	3.5	3.1	
Calor total en los gases de escape "d" (a+b+c) [kW]	28.3	27.4	25.6	24.6	23.9	
Calor absorbido por el agua de enfriamiento "e" [kW]	48.15	47.26	46.36	46.36	43.69	
Calor que sale "Qs" (d+e) [kW]	76.44	74.64	72.00	70.97	67.63	
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	0.003	-0.011	-0.031	-0.088	-0.127	

7.3.1.1 Ejemplo de Cálculos para el Diesel – (Prueba No. 4)

Flujo de combustible corregido = (Flujo de Combustible indicado)(Factor de corrección)

Para el combustible Diesel estos dos son idénticos, puesto que el medidor de flujo de combustible se calibra para este combustible, por lo que el factor de corrección es 1.

$$\text{Flujo de Combustible real} = 6.07 \frac{l}{hr}$$

Relación Aire / Combustible (En volumen)

Relación Estequiométrica A/C en base Volumétrica = 9.82:1 (De la pag 122)

$$\begin{aligned} \text{Exceso de aire } (\lambda) &= \left[\left(\frac{20.9}{20.9 - O_2} \right) - 1 \right] (100) = \left[\left(\frac{20.9}{20.9 - 4.5} \right) - 1 \right] (100) \\ &= 27.44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Relación aire / combustible} &= (\text{Relación Estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) \\ &= (9.82) \left(\frac{27.44}{100} + 1 \right) \\ &= (9.82) (1.2744) \\ &= 12.51:1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de Aire} &= (\text{Flujo de Combustible}) (A/C_{vol}) \quad (\text{volumen}) \\ &= \left(6.07 \frac{l}{hr} \right) (12.51) \\ &= 75.96 \frac{l}{hr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de combustible} &= (\text{Flujo volumétrico de combustible}) (\text{Densidad del Combustible (masa)}) \\ &= \left(6.07 \frac{l}{hr} \right) \left(850 \frac{kg}{m^3} \right) \left(\frac{1}{1000} \frac{m^3}{l} \right) \\ &= (6.07 \times 10^{-3}) (850) \\ &= 5.16 \frac{kg}{hr} \end{aligned}$$

Relación aire / combustible (masa)

Relación estequiométrica A/C en base masa = 14.4:1 (De la pag 122)

$$\begin{aligned}
 \text{Relación aire / combustible} &= (\text{Relación estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) \\
 &= (14.4)(1.2744) \\
 &= 18.35:1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Flujo de aire} &= (\text{Flujo de combustible}) (A/C \text{ masa}) \quad (\text{masa}) \\
 &= \left(5.16 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) (18.35) \\
 &= 94.68 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Calor de entrada} &= (\text{flujo de combustible (masa)}) (\text{Poder Calorífico Superior del Combustible}) \\
 &= \left(5.16 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(45\,500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) \\
 &= \left(234\,780 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) \\
 &= 65.21 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\
 &= 65.21 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

7.3.2 Investigación de la Relación Aire / Combustible y la Condición Estequiométrica

1. Asegure que la boquilla de 1.35 US gal/hr este en buen estado.
2. Inicie el quemador de combustible líquido que enciende como lo descrito en el procedimiento de operación.
3. Ponga la presión de la bomba de combustible en un nivel, donde una gama amplia de proporciones de aire / combustible pueden lograrse, ésta es aproximadamente 70kW de entrada de calor, mantenga ésta constante a lo largo del experimento (Aproximadamente 120 psi en la boquilla de 1.35 US gal/hr).
4. Ajuste el flujo de agua de enfriamiento para dar una temperatura a la salida del agua de enfriamiento (T_2) entre 60 y 80°C, conserve el flujo constante a lo largo del experimento
5. Ajuste el control de aire en la posición mínima en que pueda sostenerse la combustión.
6. Permita que las condiciones se estabilicen, y tome el registro de las lecturas en la hoja de observación.
7. Aumente el flujo de aire cambiando la posición de la compuerta una graduación.
8. De nuevo permita que las condiciones se estabilicen, y registre las lecturas.
9. Continúe aumentando el flujo de aire en etapas, hasta que el control de aire sea el máximo que se pueda alcanzar o la combustión no pueda sostenerse.
10. Apague el quemador como lo descrito en el procedimiento de operación.
11. Procese las lecturas como se muestra en las hojas de resultados.

Los valores de O_2 y CO_2 se obtienen del analizador de gases estándar.

C492 OBSERVACIONES:

Dia: 26-Jun-03
 Quemador: NOL3
 Boquilla: 1.35 (Usgal/hr)

Combustible: Diesel
 Densidad Relativa: 0.85
 Relacion Estequiometrica A/C (vol) 9.82
 Relacion Estequiometrica A/C (masa) 14.4
 Temperatura Ambiente [°C] 24
 Presion Ambiente [kPa] 78.3

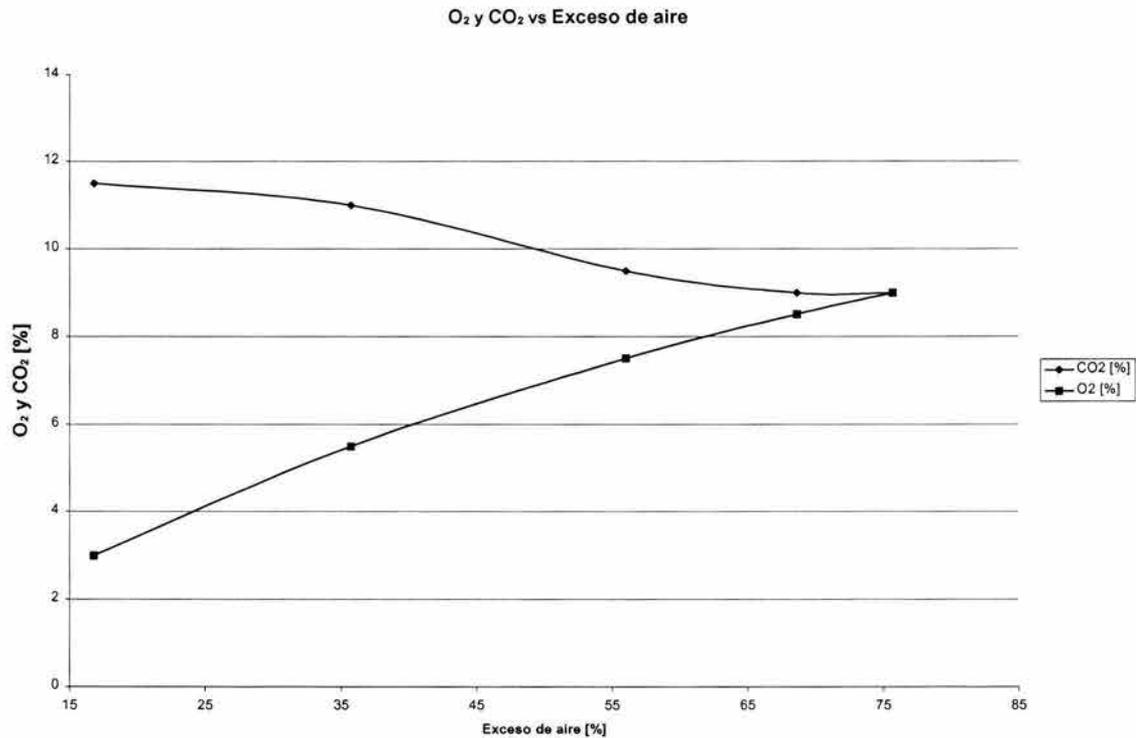
Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Presion de la bomba [psi]	120	120	120	120	120	120
Apertura de la compuerta del ventilador	2	3	4	5	6	7
Colocación del difusor	3	3	3	3	3	3
Lectura del gasto de combustible [L/hr]	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07
Gasto del agua de enfriamiento [g/s]	213	213	213	213	213	213
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada [°C]	18	18	18	18	17	17
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida [°C]	68	66	65	63	61	57
Temperatura del aire a la entrada [°C]	24	24	24	24	24	24
Temperatura de los gases producto de la combustión [°C]	671	677	670	667	662	648
Lectura de O2 [%]	3.0	5.5	7.5	8.5	9.0	9.0
Lectura de CO2 [%]	11.0	11.0	9.5	9.0	9.0	8.0
Lectura de CO [%]	1	0	0	0	0	0
Exceso de aire [%]	16.76	35.71	55.97	68.55	75.63	75.63
Temperatura de la flama [°C]	1030	998	930	906	903	877

C492 RESULTADOS:

Día: 26-Jun-03
 Quemador: NOL3
 Boquilla: 1.35 (Usgal/hr)
 hf @ Tcomb [kJ/kg] 100
 hg @ Tcomb [kJ/kg] 2545
 ϕ [%]

Combustible: Diesel
 Densidad Relativa: 0.85
 Relacion Estequiometrica A/C (vol) 9.82
 Relacion Estequiometrica A/C (masa) 14.4
 Temperatura Ambiente [°C] 24
 Presion Ambiente [kPa] 78.3
 ω [kgw/kga] 0.015

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Gasto de combustible corregido (L/hr)	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07
Relación Aire / Combustible (base Vol)	11.47	13.33	15.32	16.55	17.25	17.25
Gasto de aire (base Vol)	69.60	80.90	92.97	100.47	104.69	104.69
Gasto de combustible en base masa. [kg/hr]	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16
Relación Aire / Combustible (base masa)	16.81	19.54	22.46	24.27	25.29	25.29
Gasto de aire (base masa)	86.75	100.83	115.88	125.23	130.49	130.49
Calor Suministrado "Qe" [kW]	65.21	65.21	65.21	65.21	65.21	65.21
Calor Sensible "a" [kW]	19.00	26.01	29.39	31.51	32.52	31.81
Combustible no quemado "b" [kW]	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entalpia del vapor de agua a la temperatura de los G. C.	3863.00	3876.00	3861.00	3854.00	3843.00	3812.00
Calor en el vapor de agua "c" [kW]	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Calor total en los gases de escape "d" (a+b+c) [kW]	23.6	29.4	32.8	34.9	35.9	35.2
Calor absorbido por el agua de enfriamiento "e" [kW]	44.58	42.80	41.91	40.12	39.23	35.66
Calor que sale "Qs" (d+e) [kW]	68.17	72.25	74.72	75.05	75.16	70.85
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	-0.045	-0.108	-0.146	-0.151	-0.153	-0.087
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	0.003	-0.011	-0.031	-0.088	-0.127	-0.087



7.3.3 Comparación de Dos Combustibles Líquidos

El procedimiento experimental es operar el quemador a una condición moderada y ajustar el porcentaje de Aire / Combustible a través del rango disponible, igual como se realizó en el experimento 7.3.2. Si ya se llevó a cabo dicho experimento puede utilizarse los resultados obtenidos para el combustible usado en este experimento.

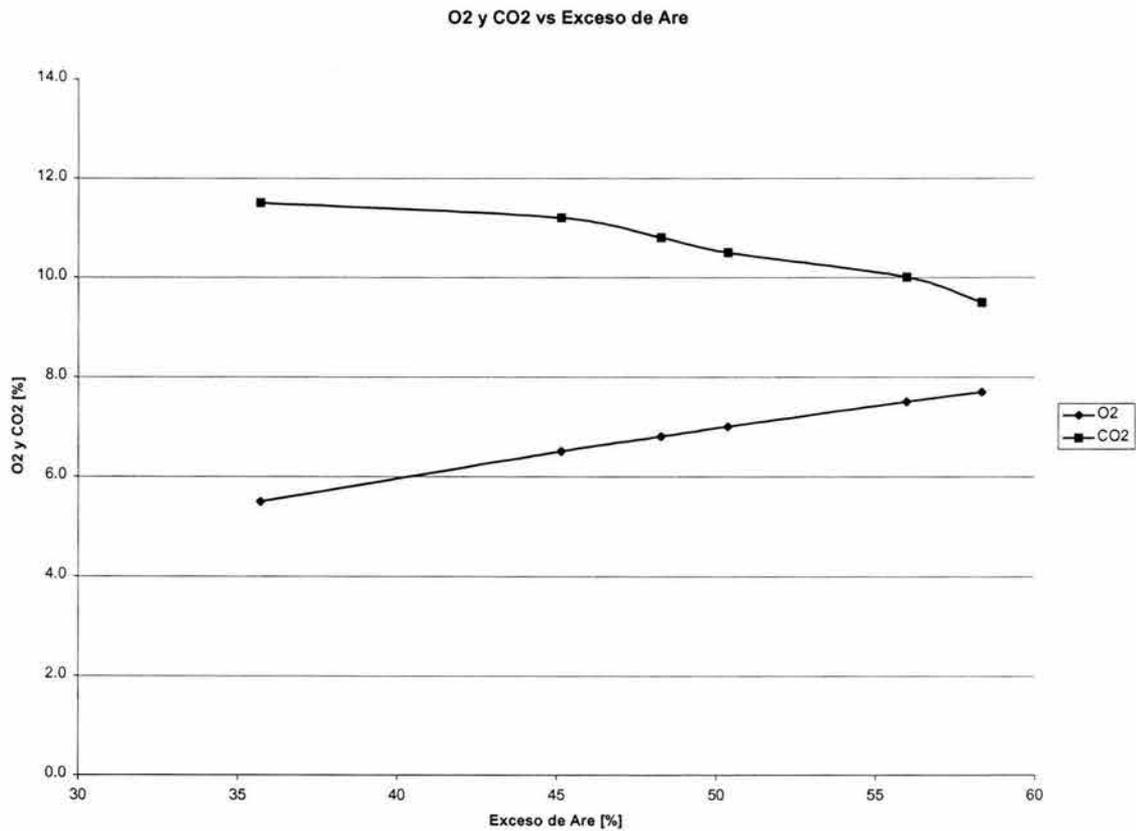
Debido a la similitud de los resultados muchas de las observaciones son visuales. Las lecturas para el Petróleo Diáfano están dadas en la siguiente tabla, y pueden ser comparadas con los resultados obtenidos para el Diesel obtenidos en el experimento 7.3.2.

C492 OBSERVACIONES:		Combustible:	Petroleo Diafano
Dia:	26-Jun-03	Densidad Relativa:	0.83
Quemador:	NOL3	Relacion Estequiometrica A/C (vol)	9.8
Boquilla:	1.35 (Usgal/hr)	Relacion Estequiometrica A/C (masa)	14.1
		Temperatura Ambiente [°C]	24
		Presion Ambiente [kPa]	78.3

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Presion de la bomba [psi]	120	120	120	120	120	120
Apertura de la compuerta del ventilador	2	3	4	5	6	7
Colocación del difusor	3	3	3	3	3	3
Lectura del gasto de combustible [L/hr]	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95
Gasto del agua de enfriamiento [g/s]	213	213	213	213	213	213
Temperatura del agua de enfriamiento a la entrada [°C]	17	17	17	17	17	17
Temperatura del agua de enfriamiento a la salida [°C]	67	66	64	62	60	58
Temperatura del aire a la entrada [°C]	24	25	25	25	24	24
Temperatura de los gases producto de la combustión [°C]	672	674	668	664	658	651
Lectura de O2 [%]	5.5	6.5	6.0	7.0	7.5	7.5
Lectura de CO2 [%]	11.5	11.5	11.0	10.5	10.0	9.5
Lectura de CO [%]	0	0	0	0	0	0
Exceso de aire [%]	35.71	45.14	40.27	50.36	55.97	55.97
Temperatura de la flama [°C]	1034	975	918	894	905	885

C492 RESULTADOS:		Combustible:	Petroleo Diafano
Dia:	26-Jun-03	Densidad Relativa:	0.83
Quemador:	NOL3	Relacion Estequiometrica A/C (vol)	9.8
Boquilla:	1.35 (Usgal/hr)	Relacion Estequiometrica A/C (masa)	14.1
hf @ Tcomb [kJ/kg]	100	Temperatura Ambiente [°C]	24
hg @ Tcomb [kJ/kg]	2545	Presion Ambiente [kPa]	78.3
	ϕ [%]	80 ω [kgw/kgaj]	0.015

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Gasto de combustible corregido (L/hr)	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95
Relación Aire / Combustible (base Vol)	13.30	14.22	13.75	14.74	15.29	15.29
Gasto de aire (base Vol)	79.14	84.63	81.79	87.67	90.95	90.95
Gasto de combustible en base masa. [kg/hr]	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
Relación Aire / Combustible (base masa)	19.14	20.46	19.78	21.20	21.99	21.99
Gasto de aire (base masa)	94.50	101.06	97.67	104.70	108.61	108.61
Calor Suministrado "Qe" [kW]	62.42	62.42	61.73	62.42	62.42	62.42
Calor Sensible "a" [kW]	20.58	21.98	21.08	22.38	23.00	22.74
Combustible no quemado "b" [kW]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entalpia del vapor de agua a la temperatura de los G. C.	3865.00	3870.00	3856.00	3847.00	3834.00	3818.00
Calor en el vapor de agua "c" [kW]	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
Calor total en los gases de escape "d" (a+b+c) [kW]	23.9	25.3	24.3	25.6	26.2	26.0
Calor absorbido por el agua de enfriamiento "e" [kW]	44.58	43.69	41.91	40.12	38.34	36.56
Calor que sale "Qs" (d+e) [kW]	68.45	68.95	66.26	65.77	64.59	62.60
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	-0.097	-0.105	-0.073	-0.054	-0.035	-0.003
Diferencia (Qe - Qs)/Qe [%]	0.003	-0.011	-0.031	-0.088	-0.127	-0.087



7.3.3.1 Ejemplo de Cómo Realizar los Cálculos utilizando el combustible líquido (Petróleo Diáfano) Prueba No. 3

Corrección para el flujo de combustible = Lo indicado en el cronómetro del flujo de combustible

$$= 5.95 \frac{l}{hr}$$

El medidor de flujo de aceite está calibrado para el combustible y no necesita corrección .

Porcentaje de Aire / Combustible (Base volumétrica)

Relación estequiométrica A/C en base volumétrica = 9.8:1 (De la pag 122)

Exceso de aire (λ) = 40.27% (Del analizador de gases de combustión)

$$\begin{aligned}
 \text{Relación Aire / Combustible} &= (\text{Relación estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) \\
 &= (9.8) \left(\frac{40.27}{100} + 1 \right) \\
 &= 13.74:1
 \end{aligned}$$

$$\text{Flujo de aire} = (\text{Porcentaje de flujo de combustible}) (A/C_{\text{vol}})$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Base volumétrica}) &= (5.95 \frac{l}{hr}) (13.74) \\
 &= 81.79 \frac{l}{hr}
 \end{aligned}$$

$$\text{Flujo de combustible} = (\text{Flujo de combustible en vol}) (\text{Densidad del Combustible})$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Base masa}) &= (5.95 \frac{l}{hr}) (830 \frac{kg}{m^3}) (\frac{1}{1000} \frac{m^3}{l}) \\
 &= (5.95) (10^{-3}) (830) \\
 &= 4.94 \frac{kg}{hr}
 \end{aligned}$$

Aire / Combustible (Base masa)

$$\text{Relación Estequiométrica A/C Base masa} = 14.1:1$$

$$\begin{aligned}
 \text{Porcentaje de Aire / Combustible} &= (\text{Relación estequiométrica}) \left(\frac{\lambda}{100} + 1 \right) \\
 &= (14.1) \left(\frac{40.27}{100} + 1 \right) \\
 &= 19.77:1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Flujo de aire} &= (\text{Flujo de combustible}) (A/C_{\text{masa}}) (\text{Base masa}) \\
 &= (4.94 \frac{kg}{hr}) (19.77) \\
 &= 97.66 \frac{kg}{hr}
 \end{aligned}$$

$$\text{Calor de Entrada} = (\text{Porcentaje de flujo combustible (masa)}) (\text{PCS del combustible})$$

$$\begin{aligned} &= \left(4.94 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \left(45\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) \\ &= \left(222\,300 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \right) \left(\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right) \\ &= 61.75 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \\ &= 61.75 \text{ kW} \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

Sobre combustibles y Combustión.

Básicamente la mayor parte de la energía que se produce en nuestros días, se obtiene por la quema de combustibles fósiles, en otras palabras, por medio del fenómeno de la combustión; la combustión es una reacción de oxidación rápida entre el combustible y el comburente (oxígeno), pero, sino se realiza de una forma adecuada, puede traer consigo grandes problemas, como puede ser una combustión deficiente, esto debido a un gran exceso de aire o a un decremento del mismo, ocasionando con esto pérdidas económicas a las empresas. En la actualidad, han sido de suma importancia los cambios atmosféricos que está teniendo nuestro planeta, de ahí que la preocupación de realizar la quema de combustibles de manera eficiente, logrando con ello un máximo aprovechamiento de la energía del combustible.

El estudio de la combustión y sus elementos asociados, combustibles y equipos, constituyen un factor importante en la utilización racional de la energía, como ya se mencionó el combustible junto con el comburente, es la fuente de la flama: el quemador la crea y mantiene. La cámara de combustión encierra a la flama y extrae de ésta el calor producido por la combustión.

El combustible es una sustancia que se quema intencionalmente para obtener energía calorífica. Su aprovechamiento debe ser práctico, tecnológico y económicamente racional. Los combustibles se encuentran en los tres estados de la materia, en forma líquida, sólida y gaseosa, para cada estado existen diferentes pruebas que se pueden realizar para obtener las características de cada combustible. Con fundamento en estas características de los combustibles, es posible tener la elección más apropiada para ciertos tipos de aplicaciones. Estas características son entre otras: composición química, poder calorífico, viscosidad, calor específico, temperatura de inflamación temperatura de flama.

Los combustibles mas utilizados en la actualidad son los derivados del petróleo y estos se pueden clasificar en

- ✓ Productos destilados: Gas natural, Gas LP y Diesel
- ✓ Productos residuales: Combustóleo

Dependiendo del yacimiento el petróleo puede ser considerado limpio ó azufrado, el petróleo limpio es aquel que contiene menos del 2% de azufre en su composición química, y estos son los que se extraen del mar del norte y el petróleo azufrado es el que tiene mas del 2% de azufre en su composición química. El petróleo mexicano figura mundialmente entre los más azufrados del 3.65 al 5.3 % en su contenido. Por esta razón se debe de tener más cuidado en la quema del combustible nacional, ya que si alcanzamos la temperatura de condensación dentro del equipo el azufre al combinarse con el agua formará ácido sulfúrico (H_2SO_4) ó sulfuroso (H_2SO_3) lo que ocasionará grandes daños de corrosión dentro del equipo, por este motivo es recomendable controlar adecuadamente la temperatura de salida de los gases producto de la combustión para evitar así la condensación.

Sobre quemadores.

Los quemadores son los dispositivos que permiten realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica requerida, distribuyendo la zona de reacción (flama) y la circulación de los productos de combustión, de modo que se transfiera la carga, de la manera mas eficiente posible, todo el calor producido; generando un nivel mínimo de contaminantes durante el proceso de combustión.

Algunas características básicas para especificar un quemador son el tipo(s) de combustible(s) a quemar, el campo de regulación de potencia, rango de composición de los combustibles que puede quemar, tipo de oxidante, ya sea aire, gases de post-combustión u otro, presión del aire de combustión, ya sea forzado (presión positiva) o inducido (presión negativa), etc; aunque la mas utilizada depende del tipo de combustible utilizado. Esta clasificación se especifica en: quemadores de gas, de combustibles líquidos y de combustibles sólidos. En el caso de estos últimos, si la aportación

de sólido se realiza neumáticamente (carbón pulverizado p.e.) existe una cierta homogeneidad con respecto al equipo utilizado para los otros combustibles. La clasificación de los quemadores también se puede especificar por el tipo de proceso industriales.

Un quemador básicamente se compone de cuatro sistemas principales que son:

- Sistema de ignición
- Sistema de admisión de combustible
- Sistema de admisión de aire
- Sistema de control

Aunque algunos quemadores especiales pueden incluir otros sistemas, como pueden ser los diversos tipos de boquillas, sistemas de seguridad, sistemas de precalentamiento, etc; siempre contendrán al menos estos elementos básicos.

Sobre los Experimentos Realizados en la Cámara de Combustión.

a) Investigación del campo de regulación de potencia del quemador.

Para el quemador de combustibles gaseosos se obtuvo un campo de regulación de 1.5 : 1; es decir, a fuego alto se obtuvo un suministro de calor de 110.87 kW y a fuego bajo se obtuvo un suministro de calor de 85 kW. Estos datos representan un valor cercano a los descritos en el capítulo sobre quemadores, que el campo de regulación de potencia para quemadores tipo paquete es cercano a la proporción 2:1 en este rango de calor suministrado.

Para el quemador de combustibles líquidos se obtuvo un campo de regulación de potencia de 1.25: 1; es decir, para fuego alto un suministro de calor de 76.71kW y a fuego bajo de 60 kW. Si bien, solo fue posible realizar el experimento con la boquilla de 1.35 gal/hr no alcanzando un campo de regulación de potencia óptimo o cercano a lo esperado (2:1), el suministro de calor será mayor utilizando la boquilla de 2.0 gal/hr, pero esto no garantiza que el campo de regulación de potencia también aumente.

b) Investigación de la Relación Aire / Combustible y la Condición estequiométrica.

En estos experimentos se obtuvo la gráfica que muestra la relación entre el porcentaje de exceso de aire y el porcentaje de O₂ y CO₂. En base a la gráfica obtenida utilizando como combustible el gas L.P. podemos encontrar: la relación Aire / Combustible adecuada para quemar gas L.P. es cercana al 5%

de exceso de aire y corresponde a $16.81 \left[\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}} \right]$ y este es el punto donde se obtiene el máximo porcentaje de CO₂, lo que también podría garantizar una combustión adecuada.

En base a la gráfica obtenida utilizando como combustible Diesel, la relación Aire / Combustible adecuada está entre los valores de 16 y 19 $\left[\frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}} \right]$, correspondiente a un exceso de aire del 20 a 25%.

c) Comparación del Análisis Teóricos y Prácticos de los Gases Producto de la Combustión.

La comparación entre los resultados teóricos y los resultados obtenidos, utilizando el analizador de gases "Fyrite", es posible apreciarlos en la gráfica de la página 141. Los resultados en ambas situaciones son muy cercanos, por no decir iguales; esto significa que el fenómeno de combustión realizado en la cámara de combustión se modela adecuadamente con las ecuaciones teóricas explicadas a lo largo del capítulo de combustión.

Es pertinente la aclaración que los resultados teóricos fueran obtenidos suponiendo la combustión del propano y no una mezcla de propano y butano (gas LP).

d) Comparación de dos Combustibles Líquidos.

La comparación de los combustibles líquidos es en gran manera cualitativa, debido a la gran similitud de los resultados obtenidos y consecuencia de que ambos combustibles pertenecen a la misma familia de hidrocarburos, ya que sus propiedades como son viscosidad y densidad son muy similares. Los resultados que variaron significativamente son la relación Aire / Combustible en base masa, mientras en el Diesel es del orden de 16.81 a 25.29, en el petróleo Diáfano esta relación fue del orden de 19.14 a 22% no permitiendo una gran variación del porcentaje del exceso de aire.

El calor suministrado por el combustible Diesel (65.21kW) fue ligeramente mayor que el suministrado por el petróleo Diáfano (62.42 kW), a las mismas condiciones de suministro de combustible (presión de la bomba), se observa un cambio, que se considera despreciable.

e) Balance de Energía

En el balance de energía, se observa, de acuerdo con la gráfica de la página 146, que a medida que aumenta el exceso de aire, se pierde calor al calentar el exceso de aire; y por consiguiente disminuye el calor que se puede aprovechar. También se observa en la tabla de resultados de la página 134 que la eficiencia de la cámara es muy alta (presenta pérdidas del 0.07%), lo que implica que casi la totalidad de la energía contenida en el combustible se puede aprovechar para diversos procesos, como es calentar el agua o el aprovechamiento de la alta temperatura de los gases producto de la combustión.

Sobre la Cámara de Combustión.

Al realizar las pruebas en la cámara de combustión Hilton C492 notamos que los quemadores tanto el de gas como el de combustibles líquidos, en algunos aspectos no cumple con las características especificadas por el fabricante para realizar los experimentos que ellos: por ejemplo: en el quemador de gas. el fabricante especifica en sus experimentos, éste alcanza una apertura de damper del número 10 con una presión aproximada de la mitad del rango de presión que nos da la válvula multiblock (25 mbar): al realizar las pruebas a nivel de la ciudad de México la mayor apertura de damper que fue posible alcanzar para obtener una buena combustión fue a número 4 con una presión de 49 mbar. cercana a la máxima presión que permite regular la válvula multiblock, por esta razón no fue posible alcanzar un amplio rango de mediciones de gases de combustión, esto nos indica que el ventilador del quemador de gas esta posiblemente sobre diseñado.

Con el quemador de combustibles líquidos se presenta otro caso: con la boquilla de 1.35 galones / hora funciona perfectamente dentro del rango de 100 a 140 psi, alcanzando la máxima apertura en el damper, logrando con esto un buen experimento; pero al utilizar la boquilla de dos galones con la presión mínima estipulada por el fabricante de 100 psi, la flama sale de la cámara de combustión, llegando hasta a campana de la chimenea, superando con esto los puntos de toma de muestra de gases producto de la combustión, esto nos ocasiona que las muestras de los gases de combustión no sean reales, puesto que en ese punto todavía se este llevando a cabo el proceso de combustión, y esto podría ocasionar daños a la estructura de la chimenea, ya que esta no está diseñada para estas condiciones de trabajo; por lo que se puede concluir; que el espacio provisto para la cámara de combustión es muy pequeño, y es insuficiente para la capacidad del quemador con la boquilla de 2 galones / hora, esto trae como consecuencia problemas tales como: que el quemador se apague constantemente al elevar la presión; como el combustible no se quema totalmente, al reiniciar el quemador se producen explosiones, que pueden dañar la pared de refractario o la cámara de combustión.

Anexo I

I.I ECUACIONES GENERALES DE CONSERVACION

I.I.I Introducción

En este anexo se presenta la base matemática que reproduce los fenómenos de transporte involucrados en cualquier proceso en el que exista transferencia de masa, cantidad de movimiento o energía, entre ellos la combustión. Como se ha visto en temas anteriores, éste es un aspecto de primordial importancia en el desarrollo de los procesos de combustión, y también queda recogido el efecto de las reacciones químicas en los términos fuente de algunas de las ecuaciones generales de conservación. Por eso, el planteamiento de estas ecuaciones ofrece la posibilidad de iniciar un análisis de cada tipo de proceso, si posteriormente se aplican las particularizaciones y simplificaciones adecuadas.

Las ecuaciones generales que rigen dichos procesos son:

- Ecuación de la continuidad. Constituye 1 ecuación.
- Ecuación de conservación de la masa. Si en el proceso participan n especies, se pueden tomar hasta $n-1$ ecuaciones de este tipo, pues la n -sima sería combinación lineal de las anteriores y de la de continuidad.
- Ecuación de conservación del momentum. Existen 3, correspondientes a las tres direcciones espaciales.
- Ecuación de conservación de la energía. Constituye 1 ecuación.
- Ecuación de conservación de las características del flujo turbulento. Se puede plantear en el caso de que el proceso sea turbulento. En el modelo $\kappa - \varepsilon$, por ejemplo, se plantean dos ecuaciones (de la energía cinética turbulenta, κ , y de su velocidad de disipación, ε).

Sin contar con esta última ecuación; aparecen $n + 4$ ecuaciones, que, unidas a la ecuación de estado y a la condición algebraica consistente en que la suma de las fracciones másicas de todas las especies sumen la unidad ($\sum Y_i = 1$), resuelven las $n + 6$ incógnitas (las fracciones másicas de las n especies, la presión, la temperatura, la densidad y las tres componentes de la velocidad). En el caso de considerar la turbulencia, aparecen dos ecuaciones y dos incógnitas más.

I.I.II Ecuación de la continuidad

Es la ecuación de conservación de masa. En forma diferencial se escribe:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0$$

O lo que es lo mismo, con notación resumida:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

Para aplicaciones en régimen estacionario desaparece la derivada temporal:

$$\text{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

y si además el flujo es incompresible, la densidad es constante, queda:

$$\operatorname{div}(\vec{u}) = 0$$

Habitualmente en los procesos de combustión se asume flujo estacionario e incompresible, al suponer presión y densidad constantes con el tiempo, con el fin de facilitar la resolución de las ecuaciones. En el modelado de los procesos de combustión en motores alternativos se suele adoptar cuasi-estacionariedad, asumiendo densidad constante durante cada intervalo de tiempo, aunque ello supone una aproximación discutible.

I.I.III Ecuación de Conservación de Materia

Se puede definir en términos de masa, n° de moles, concentraciones, etc. Para definirla en términos de masa se hace uso de la fracción másica de cada especie i :

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho}$$

siendo ρ la densidad total de la mezcla y siendo ρ_i la densidad parcial de la especie i , es decir la densidad de la especie i a su presión parcial. La ecuación de conservación de la especie i queda:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} Y_i) + \operatorname{div}(-\rho D_i \operatorname{grad} Y_i) = \dot{w}_i$$

T. no estac. T. convectivo T. difusivo T. fuente

Aparte del término no estacionario y del término convectivo, que ya aparecían en la ecuación de continuidad, aparecen dos nuevos términos:

- El término difusivo se apoya en la ley de Fick, que dice que dado un gradiente de concentraciones hay un transporte másico en dirección de las concentraciones decrecientes:

$$\vec{u} = -\rho D_i \operatorname{grad} Y_i$$

Donde D_i es el coeficiente de difusión másico de la especie i , que depende tanto de ésta como de las que la rodean. A menudo este coeficiente no se conoce, por lo que se suele asignar a la viscosidad μ (es decir, $Le = 1$). Es un término en segundas derivadas, por ser la divergencia de un gradiente.

- El término fuente tiene en cuenta la velocidad de aparición (fuente) o desaparición (sumidero) de especies.

La ecuación de conservación de cada especie puede expresarse restándole Y veces la de continuidad, por lo que es habitual encontrarla de la forma:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u_x \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial Y_i}{\partial z} + \operatorname{div} \vec{u}_i = \dot{w}_i$$

Es importante una adecuada elección de las $n-1$ especies cuyas ecuaciones se plantean, de forma que la resolución sea lo más sencilla posible. Como se ha dicho, las fracciones másicas deben además cumplir la condición de sumar la unidad:

$$\sum Y_i = 1$$

I.I.IV Ecuación de Conservación del Momento

Esta ecuación está basada en la segunda ley de Newton:

$$\sum \vec{F} = \frac{D(\vec{m}u)}{Dt}$$

Dentro de la sumatoria se incluyen fuerzas másicas (gravitatorias, magnéticas, etc.) y fuerzas de superficie (presión, tensiones normales, tensiones cortantes). Las primeras son, por lo general, poco importantes, mientras que sí lo son las superficiales.

El término en derivada total, identificado con D, incluye la derivada temporal (término no estacionario), y las derivadas espaciales (término convectivo). La ecuación vectorial resultante se puede descomponer en las tres direcciones espaciales. Por ejemplo, en la dirección x:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} u_x) = i \sum_1^n (Y_i f m_i)_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

Las tensiones superficiales son proporcionales (según la ley de Stokes) a las velocidades de deformación, a través del coeficiente de viscosidad, μ :

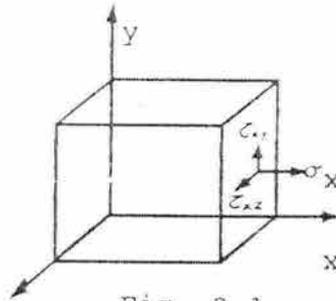


Fig. 2.1.

$$\sigma_x = -p + \mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{u} \right)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

Reordenando:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} u_x) + \text{div}(-\rho \nu \text{grad} u_x) = T.F.$$

Donde se han incluido las fuerzas másicas y superficiales en un término difusivo (divergencia del gradiente) y un término fuente. Este último:

$$T.F. = \sum_{i=1}^n (Y_i f m_i)_x + \frac{1}{3} \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$$

La derivada parcial de la presión sale como consecuencia de derivar la expresión anterior de σ_x . Este término desaparece en el caso de considerar presión uniforme. El segundo sumando incluye los términos viscosos no contenidos en el término difusivo de la ecuación. Este término desaparece si el flujo es incompresible. El primer sumando, las fuerzas másicas, son normalmente despreciables. Con esta estructura queda una ecuación semejante a la ecuación de conservación de especies, e igual que aquella, se puede expresar combinándola con la ecuación de la continuidad, con lo que el producto ρu se puede sacar fuera de la integral.

I.I.V Ecuación de Conservación de la Energía

Esta ecuación es una expresión del primer principio de la termodinámica. Así pues, partiendo de su forma más general:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} e) = -\text{div}(\vec{q}) + \dot{Q} + \dot{W}$$

Donde se ha indicado por 'e' a la energía interna ($h-p/\rho$) más la energía cinética:

$$e = (h - p)/\rho + \frac{1}{2} u^2$$

Los dos términos del primer miembro de la ecuación constituyen la derivada total D, y corresponden al término no estacionario y al término convectivo. En el segundo miembro aparecen el calor intercambiado, la fuente térmica y el trabajo de las fuerzas externas (másicas y superficiales). El calor intercambiado en el interior del sistema, \vec{q} , sigue la ley de Fourier:

$$\vec{q} = -K \text{ grad } T$$

Aparte del calor intercambiado por radiación y de algunos efectos secundarios como el efecto "Dufour" (todo gradiente de concentraciones lleva asociado un pequeño gradiente de temperaturas), que son normalmente despreciados.

Estructurando la ecuación de la misma forma que las anteriores:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} C_p T) + \text{div}(-\rho \alpha \text{grad} C_p T) = T.F.$$

T.no estac. T.convectivo T.difusivo T.fuente

Quedando el término fuente:

$$T.F. = \frac{\partial(p - \frac{1}{2} \rho u^2)}{\partial t} + \text{div}[u(p - \frac{1}{2} \rho u^2)] + \dot{Q} + \dot{W}$$

Con el fin de comprobar la equivalencia entre las distintas expresiones de la ecuación de la energía, se va a deducir a continuación la expresión aplicable a un caso simple como es el flujo que circula por una tobera. En este caso se puede asumir que el flujo es estacionario (desaparecen las derivadas temporales) y unidireccional (desaparecen las derivadas en y - z), y que no hay ni generación ni transmisión de calor ni fuerzas másicas externas. En cuanto a las fuerzas superficiales externas, se tienen en cuenta las tensiones normales y se desprecian los términos viscosos (derivadas cruzadas). Como las anteriores, también esta ecuación se puede expresar combinada con la ecuación de la continuidad, lo que permite sacar fuera de las derivadas al producto ρu .

$$\rho u \frac{dh}{dx} - \rho u \frac{d\left(\frac{p}{\rho}\right)}{dx} + \rho u \frac{d\left(\frac{1}{2}u^2\right)}{dx} = \frac{d(\sigma u)}{dx} = -\frac{d(pu)}{dx}$$

Resolviendo las derivadas de (p/ρ) y de (pu):

$$\rho u \frac{dh}{dx} - u \frac{dp}{dx} + \frac{up}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} + \rho u \frac{d\left(\frac{1}{2}u^2\right)}{dx} = -p \frac{du}{dx} - u \frac{dp}{dx}$$

y como por la ecuación de continuidad ρ*du/dx = -u*d ρ/dx:

$$\rho u \frac{dh}{dx} + \rho u \frac{d\left(\frac{1}{2}u^2\right)}{dx} = 0$$

Integrando entre dos secciones:

$$C_p T + \frac{1}{2}u^2 = cte$$

que es la expresión del primer principio para sistemas abiertos, aplicable, por ejemplo, a toberas.

I.I.VI Forma General de las Ecuaciones Conservativas

A la vista de la estructura común de todas las ecuaciones, existe una forma general de plantear todas ellas:

$$\frac{\partial(\rho_\phi)}{\partial t} + \text{div}\left(\rho \vec{u}_\phi\right) + \text{div}\left(\rho \vec{u}_\phi\right) = S_\phi$$

En el caso de considerar la turbulencia, la ecuación correspondiente también se puede plantear de esta forma, aunque su estructura no responda exactamente al fenómeno físico. En la tabla siguiente, se recogen los valores de las funciones que caracterizan cada una de las ecuaciones vistas en los apartados anteriores, estructuradas según la mencionada ecuación general.

Ecuación	Φ	\vec{J}_ϕ	S _φ
continuidad	1	0	0
conservación de la materia	Y _i	-Di grad Y _i (Fick)	\dot{w}_i
conservación de momento	u _i	-μ grad u _i (Stokes) (Newton)	$\frac{\partial p}{\partial x}$ F. másica T.viscoss
conservación de la energía	h	-α grad h (Fourier)	F. térmica T. viscosa D(p-1/2ρu ²)/Dt
energía turbulenta	k	-Γk grad K	G - ρε
Disipación de energía turbulenta	ε	Γ ε grad ε	C ₁ εG/k-C ₂ ρ ε ² /k

En las ecuaciones de la turbulencia se ha llamado G a la generación de turbulencia, y:

$$\Gamma_k = \mu_t \quad \Gamma_\varepsilon = \frac{\mu_t}{1.2} \quad \mu_t = \frac{C_p k^2}{\varepsilon}$$

Los métodos de resolución de este sistema de ecuaciones pueden ser variados, y se comentarán más adelante.

I.I.VII Coeficientes de los Términos Difusivos

Son los coeficientes que acompañan a los términos difusivos de las anteriores ecuaciones. A continuación se comentan algunas de sus características:

- Coeficiente de difusión másico. Determina la proporcionalidad entre el flujo másico difusivo de una especie A en presencia de otra B y el gradiente de concentración de A. Se expresa en m^2/s . Algunos valores se muestran en la tabla siguiente. Se cumplen las siguientes relaciones de proporcionalidad:

$$D \text{ proporcional a } T^\alpha/p \quad 1.5 \leq \alpha \leq 2$$

$$D \text{ proporcional a } 1/\sqrt{\text{peso - molecular}}$$

Gases	$D \cdot 10^5 \text{ (m}^2/\text{s)}$
NH ₃ -aire	2.36
CO ₂ -aire	1.64
H ₂ -aire	4.10
O ₂ -aire	2.06
H ₂ O-aire	2.56
C ₆ H ₆ -aire	0.88
CO ₂ -H ₂ O	2.00
CO ₂ -N ₂	1.70

- Coeficiente de difusión de cantidad de movimiento. Coincide con la viscosidad cinemática y tiene unidades de m^2/s . Se cumplen las siguientes proporcionalidades:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ proporcional a } T^\alpha/p$$

$$\mu \text{ proporcional a } T^\beta \quad 0.5 \leq \beta \leq 1$$

Para calcular la viscosidad dinámica del aire, cuando el flujo es laminar, se puede utilizar la correlación de Sutherland:

$$\mu = 1,4972 \cdot 10^{-6} \frac{T^{1.5}}{T + 110.4} \quad \mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right], T(K)$$

- Coeficiente de difusión térmico. Es la conductividad térmica del gas, expresada de forma que sus unidades sean las mismas que las de los otros coeficientes de difusión. Se cumplen las siguientes relaciones de proporcionalidad:

$$\alpha = \frac{kg}{\rho C_p} \quad \text{proporcional a} \quad \frac{T^\alpha}{T^\beta}$$

kg proporcional a T^β

Existe una serie de números adimensionales que relacionan estos coeficientes de difusión:

- Número de Prandtl: Expresa el cociente entre el transporte de momento y el transporte de calor.

$$Pr = \nu/\alpha, 0,66 \leq Pr \leq 1$$

Teóricamente se demuestra que $Pr = 4\gamma / (9\gamma - 5)$, siendo γ la relación de calores específicos. Su valor permanece casi constante y próximo a la unidad. Para el aire vale 0.74.

- Número de Schmidt: Expresa el cociente entre el transporte de momento y el de masa.

$$Sc = \nu/D$$

A diferencia del Pr, depende de las características de las dos sustancias que componen la mezcla: Para un gas A habrá tantos Sc como gases B haya diluidos en su seno. Su valor permanece también ligeramente inferior a la unidad.

- Número de Lewis: Expresa el cociente entre el transporte de calor y de masa. Igual que, el Sc se define para cada pareja de gases de una mezcla multicomponente.

$$Le = \alpha / D$$

En la mayoría de las mezclas gaseosas su valor es muy próximo a la unidad, y en particular, e las mezclas de aire y combustible es ligeramente inferior a 1. Ello justifica la usual aproximación de $Le = 1$ en análisis teóricos.

Los tres números se relacionan mediante:

$$Pr = Sc / Le$$

I.II RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES

El sistema de ecuaciones generales anteriormente planteado puede resolverse por cuatro métodos:

1. Resolver el sistema de ecuaciones completo. Para ello se pueden plantear métodos en diferencias finitas o bien en elementos finitos. Dada la complejidad de los sistemas reales, y del hecho de que se tienen en cuenta dimensiones espaciales, el tiempo y las n especies que intervienen en el proceso, en la práctica sólo se pueden resolver sistemas muy simples, en potentes ordenadores, y empleando mucho tiempo de cálculo.
2. Eliminar términos o ecuaciones. Se pueden también utilizar los anteriores métodos de cálculo, pero adoptando una serie de medidas simplificadoras, como la reducción de especies químicas, la consideración de presión constante, etc. A pesar de ello sigue siendo, por lo general, complejo de resolver
3. Eliminar dimensiones. Se trata en este caso de considerar el sistema como estacionario (se elimina el tiempo como variable), o bidimensional (se elimina una dimensión espacial), o ambas cosas a la vez. La solución puede ser analítica.
4. Modelos simples. Asumen simplificaciones considerables hasta plantear sistemas sencillos que admitan resolución analítica. Por lo general se llega a sistemas adimensionales (no dimensionales) o unidimensionales estacionarios.

I.III Adimensionalización de las ecuaciones generales

Una forma de comprobar si en un problema concreto es adecuado simplificar el sistema de ecuaciones inicial, con el fin de aproximar el problema a los modelos de tipo más simple, es adimensionalizar las ecuaciones generales. Para ello se puede empezar por adimensionalizar las variables, dividiéndolas por valores de referencia, que pueden ser, por ejemplo, valores que caracterizan el sistema por jugar un papel destacado durante el proceso:

$$\rho^* = \rho/\rho_0 \quad ; \quad t^* = t/t_0 \quad ; \quad u^* = u/u_0 \quad ; \quad x^* = x/x_0$$

La determinación adecuada de estos valores de referencia es de suma importancia para la correcta resolución del sistema.

I.III.I Adimensionalización de la Ecuación de Conservación de la Masa

La ecuación de conservación de masa quedará:

$$\frac{\rho_0}{t_0} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \frac{\rho_0 u_0}{x_0} \frac{\partial (\rho^* u^*)}{\partial x^*} = 0$$

$$\frac{x_0}{t_0 u_0} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \rho^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + u^* \frac{\partial \rho^*}{\partial x^*} = 0$$

Si se toma como variables de referencia los siguientes valores:

- $\rho_0 = \rho_{\text{ref}}$, es decir, la densidad en condiciones de referencia.
- $t_0 = l/f$, siendo f la frecuencia característica del proceso.
- $x = L$, es decir, una longitud característica del sistema.
- $u_0 = a$, es decir, la velocidad del sonido a una temperatura de referencia.

entonces se puede expresar la ecuación en función de conocidos números adimensionales:

$$\frac{1}{St} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \rho^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + M \frac{\partial \rho^*}{\partial x^*} = 0$$

siendo : $St = a/fL$ (número de Strouhal)

$M = u/a$ (número de Mach)

Escrita de esta forma la ecuación, se puede observar que si el número de Strouhal es grande la derivada temporal (término transitorio) es despreciable, y si el número de Mach es pequeño se puede despreciar el término de variación de densidad.

I.III.II Adimensionalización de la Ecuación de Conservación del Momento

Lo mismo se puede hacer con la ecuación de conservación del momento, para lo cual se adimensionalizan las siguientes variables:

$$\left. \begin{array}{l} x^* = x/x_0 \\ y^* = y/y_0 \\ z^* = z/z_0 \end{array} \right\} x_0 = y_0 = z_0 ; \quad \left. \begin{array}{l} \rho^* = \rho/\rho_0 \\ \rho^* = \rho/\rho_0 \\ u^* = u/u_0 \end{array} \right\} ; \quad \left. \begin{array}{l} t^* = t/t_0 \\ u^* = u/u_0 \end{array} \right\}$$

Las fuerzas másicas que aparecen en esta ecuación que provienen de un potencial y, tienen como expresión general:

$$\rho \text{ grad } V$$

En el caso usual de que la única de estas fuerzas sea la gravitatoria, solo la ecuación proyectada en z se ve afectada, pues el gradiente del potencial gravitatorio es un vector de componentes (0, 0, -g). Para contemplar esta fuerza se va a adimensionalizar la ecuación en la dirección z, quedando:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_0 u_0}{t_0} \underbrace{\frac{\partial(\rho^* u_z^*)}{\partial t^*}}_{A_1} + \frac{\rho_0 u_0^2}{z_0} \underbrace{\text{div}(\rho^* \vec{u}^* u_z^*)}_{A_2} + \frac{\rho_0 v_0 u_0}{z_0^2} \underbrace{\text{div}(-\rho^* v^* \text{grad} u_z^*)}_{A_3} = \\ & = - \frac{p_0}{z_0} \underbrace{\frac{\partial p^*}{\partial z^*}}_{A_4} + \underbrace{\frac{v_0 \rho_0 u_0}{z_0^2}}_{A_4} * \frac{v^* \rho^*}{3} \underbrace{\left[\frac{\partial^2 u_x^*}{\partial x^* \partial z^*} + \frac{\partial^2 u_y^*}{\partial y^* \partial z^*} + \frac{\partial^2 u_z^*}{\partial z^{*2}} \right]}_{A_5} - \rho_0 \rho^* g \end{aligned}$$

Dividiendo la ecuación por el coeficiente que acompaña a A2 se puede expresar como:

$$\frac{z_0}{t_0 u_0} A_1 + A_2 + \frac{v_0}{u_0 z_0} A_3 = - \frac{p_0}{\rho_0 u_0^2} A_4 + \frac{v_0}{u_0 z_0} A_5 - \frac{z_0}{u_0^2} g \rho^*$$

Dando los siguientes valores a las demás variables de referencia:

$$\begin{aligned} -\rho_0 &= \rho_{\text{ref}} & -u_0 &= a \\ -t_0 &= 1/f & -p_0 &= p_{\text{ref}} \\ -x_0 = y_0 = z_0 &= L & -v_0 &= v_{\text{ref}} \end{aligned}$$

quedando la ecuación:

$$\frac{1}{St} A_1 + A_2 + \frac{M}{Re} A_3 = -Eu A_4 + \frac{M}{Re} A_5 + \frac{M^2}{F^2} \rho^*$$

siendo:

$$\begin{aligned} Re &= uL/u_0 & (\text{número de Reynolds}) \\ Eu &= p_0/\rho_0 a^2 & (\text{número de Euler}) \\ F &= u/\sqrt{gL} & (\text{número de Froude}) \end{aligned}$$

Para el caso de gases, en el número de Euler y en el término de la fuerza gravitatoria, puede sustituirse la velocidad del sonido por su expresión, quedando:

$$\begin{aligned} Eu &= 1/\gamma & \text{siendo } \gamma \text{ la relación de calores específicos del gas.} \\ M^2/F^2 &= \rho_0 g L / \gamma p_0 \end{aligned}$$

Se observa, por ejemplo, que si St, Re y F son grandes y M pequeño (aunque esto último no es necesario) se llega a:

$$A_2 + 1/\gamma A_4 = 0$$

La última expresión de la ecuación de conservación del momento no significa que cuando la turbulencia aumenta (y por tanto el Re) el término difusivo (A disminuya, lo cual sería contradictorio, sino que éste es despreciable frente al convectivo cuando la relación entre fuerzas viscosas y elásticas es pequeña.

I.III.III Adimensionalización de la Ecuación de Conservación de la Energía

Al aplicar este mismo tratamiento a la ecuación de conservación de la energía queda: (con $p^* = p - 1/2\rho u^2$)

$$\frac{Cp_0 \rho_0 T_0}{t_0} \underbrace{\frac{\partial(\rho^* Cp^* T^*)}{St^*}}_{A_1} + \frac{\rho_0 u_0 T_0 Cp_0}{x_0} \underbrace{div(\rho^* \vec{u}^* Cp^* T^*)}_{A_2} + \frac{\rho_0 Cp_0 T_0 \alpha_0}{x_0^2} *$$

$$\underbrace{* div[-\rho^* \alpha^* grad(Cp^* T^*)]}_{A_3} = \frac{p_0}{t_0} \underbrace{\frac{\partial p^*}{\partial t^*}}_{A_4} + \frac{u_0 p_0}{x_0} \underbrace{div(\vec{u}^* p^*)}_{A_5} + \dot{Q} + \dot{W}$$

Dividiendo por el coeficiente del término convectivo, A2:

$$\frac{x_0}{t_0 u_0} A_1 + A_2 + \frac{\alpha_0}{x_0 u_0} A_3 = \frac{p_0 x_0}{\rho_0 t_0 u_0 Cp_0 T_0} A_4 + \frac{p_0}{\rho_0 Cp_0 T_0} A_5 + \frac{x_0 (\dot{Q} + \dot{W})}{\rho_0 u_0 Cp_0 T_0}$$

Y tomando las mismas variables de referencia:

$$\frac{1}{St} A_1 + A_2 + \frac{M}{Re Pr} A_3 = \frac{\gamma - 1}{\gamma St} A_4 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} A_5 + \frac{L(\dot{Q} + \dot{W})}{\rho_0 a Cp_0 T_0}$$

I.III.IV Adimensionalización de la Ecuación de Conservación de Especies

Más fácil resulta adimensionalizar la ecuación de conservación de especies, pues la variable Y_i ya es adimensional.

$$\frac{\rho_0}{t_0} \underbrace{\frac{\partial(\rho^* Y_i)}{St^*}}_{A_1} + \frac{\rho_0 u_0}{x_0} \underbrace{div(\rho^* \vec{u}^* Y_i)}_{A_2} + \frac{\rho_0 Di}{x_0^2} \underbrace{div(-\rho^* grad Y_i)}_{A_3} = \dot{W}_i$$

Dividiendo la ecuación por el coeficiente de A_2 y tomando las variables de referencia definidas:

$$\frac{1}{St} A_1 + A_2 + \frac{M}{Re Sc} A_3 = \frac{L}{\rho_0 a} \dot{W} i$$

En las dos últimas ecuaciones, se observa que los coeficientes de las fuentes química, térmica y de términos viscosos no se pueden expresar en función de números conocidos por lo que habría que estimar en cada caso la importancia de dichos términos. Sin embargo, la importancia de los demás términos y su posible desaparición se analiza como en las ecuaciones anteriores.

Anexo II

ANALIZADORES DE GASES

PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN

II.I INTRODUCCIÓN

El seguimiento de las combustiones se realiza en la industria mediante el análisis de humos, y aunque en las grandes instalaciones éste se efectúe de forma continua registrándose además los resultados obtenidos, conviene describir aquí determinados aparatos manuales, no sólo por ser de uso muy extendido en pequeñas instalaciones, sino por utilizarse también como elementos de contraste para ajustar el funcionamiento de los analizadores continuos de las grandes instalaciones.

Como es sabido, el conocimiento del análisis de humos permite determinar las variables que caracterizan las combustiones industriales, lo que justifica lo generalizado de su empleo.

II.II EL APARATO ORSAT

El analizador de humos de uso más extendido es el aparato ORSAT (Figura III.1) del que existen diversos tipos, el más sencillo de los cuales consta de tres lavadores en los que se determinan los contenidos en CO_2 , O_2 , y CO de los humos secos de una combustión.

El volumen restante se estima normalmente que es de nitrógeno, calculándose por diferencia a 100 de la suma de volúmenes de los otros componentes.

En el primero de los lavadores de un aparato ORSAT, se determina el contenido de CO_2 de los humos por absorción del mismo en una solución acuosa al 30% de Na OH ó K OH , que absorbe también el SO_2 contenido en ellos.

El segundo lavador, destinado a la absorción del O_2 contiene una disolución de piró galato potásico, mientras que en el tercero se efectúa la absorción del CO por medio de una solución de cloruro cuproso amoniacal.

Además de los tres lavadores citados, el aparato ORSAT se compone de una bureta graduada M, protegida contra el calor por una camisa de agua, un frasco nivelador F, una bomba P para efectuar la toma de muestras (purga en la tubería de humos) y una serie de llaves.

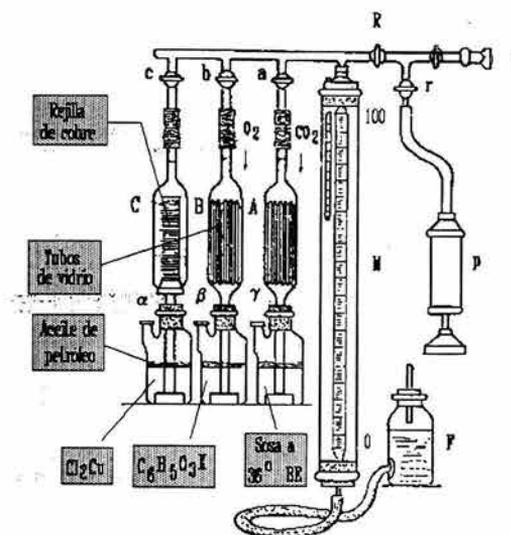


Figura III.1 Analizador de gases tipo ORSAT

II.II.I Medición con el ORSAT

La absorción de los distintos componentes de los humos debe realizarse siempre en el mismo orden, comenzando por el CO_2 , siguiendo con el O_2 y terminando por el CO , dado que la alteración de tal orden conduce inevitablemente a errores en las determinaciones (El CO_2 , por ejemplo, es absorbido por los tres reactivos). El contenido en N_2 de los humos se determina siempre por diferencia a 100 de la suma de volúmenes del resto de componentes.

Las operaciones a realizar son las siguientes:

1. Llenado de los lavadores con los correspondientes reactivos

Con las llaves a, b y c cerradas, se pone en comunicación la válvula R de tres pasos con la atmósfera. A continuación se eleva el frasco nivelador F, que se encuentra lleno de agua acidulada, hasta la altura correspondiente al nivel cien de la bureta graduada M. En virtud del principio de los vasos comunicantes, y dado que tanto la bureta como el frasco nivelador se encuentran sometidos en este momento a la presión atmosférica, el agua acidulada ascenderá por la bureta graduada M hasta la altura correspondiente al nivel cien de su escala, es decir, el líquido alcanzará la misma altura en bureta y frasco nivelador.

A continuación se cierra la válvula R, quedando el aparato aislado de la atmósfera. Si se desea llenar el lavador A con la disolución de sosa se abrirán las llaves y y a. Bajando entonces el frasco nivelador hasta el nivel cero de la bureta graduada se producirá la correspondiente depresión y, en consecuencia, la disolución de sosa, que se encuentra a la presión atmosférica al estar abierta la llave y, ascenderá por el lavador A, efectuándose su llenado. Realizando idéntica operación en los otros lavadores se llenarán asimismo con sus respectivos reactivos.

2. Toma de muestra de gas

Tras cerrar las válvulas a, b y c, se pone en comunicación el aparato ORSAT con la atmósfera mediante la apertura de la válvula R. A continuación se lleva el nivel de agua acidulada en la bureta hasta el cien de su escala elevando convenientemente el frasco nivelador. Seguidamente se aísla el aparato de la atmósfera y se pone en comunicación con la tubería de gas mediante la acción correspondiente sobre las válvulas R y r, bajando el frasco nivelador a fin de que el agua descienda por la bureta graduada hasta el nivel 0, con lo que ésta se llenará. Debe asegurarse que la muestra tomada se encuentra a la presión atmosférica, para lo que bastará con que el nivel del agua sea idéntico en la bureta y en el frasco nivelador. Tomada tal precaución, se aísla el aparato de la tubería de gas mediante el cierre de la válvula R.

3. Determinación del contenido en CO_2

Tras el cierre de la válvula R se procede a la apertura de la llave "a" (la y continúa abierta).

Elevando el frasco nivelador hasta que el agua acidulada alcance el nivel cien de la bureta graduada, se obligará al gas contenido en ella a entrar en el lavador A, donde borbotea a través de la solución de sosa.

A continuación se baja el frasco nivelador, con lo que el gas vuelve a la bureta y se igualan los niveles de agua en ésta y en el frasco nivelador. Una vez conseguida dicha igualdad de niveles, se lee el número correspondiente en la escala de la bureta. Si este número es, por ejemplo, 12 querrá decir que el contenido de CO_2 del gas es del 12 %.

4. Determinación del contenido de O_2 y CO

Se realiza a continuación de la del CO_2 , de forma análoga a la descrita, y necesariamente en tal orden, por las razones expuestas.

Continuando con el ejemplo anterior, para el que el contenido en CO_2 era del 12%, el nivel inicial para la determinación del O_2 sería el correspondiente al número 12 de la escala de la bureta, por lo

que, si tras la absorción este piro galato potásico, la igualdad de niveles de agua en bureta y frasco nivelador se alcanzara para el número 15 de la escala de la bureta, querría decir que el contenido en O_2 de los humos era del $(15 - 12) = 3\%$

A continuación se determina en el tercer lavador el contenido en CO de los humos, operando de forma análoga a la descrita para el CO_2 y O_2 .

II.III EL ANALIZADOR DE FYRITE

Fabricado por la casa BACHARACH, es un instrumento muy simple utilizado frecuentemente en pequeñas instalaciones para el control manual de las combustiones. Su funcionamiento, al igual que el del aparato ORSAT, se basa en la absorción por un reactivo adecuado del CO_2 o del O_2 contenidos en los gases de combustión, lo que provoca, a igualdad de volúmenes, una reducción de la presión ejercida por los humos que es la que de base para realizar la determinación.

El aparato (Figura III.2) es muy simple, componiéndose de dos depósitos unidos por un tubo central provisto de una escala graduable.

El fondo del depósito inferior, en el que se encuentra el reactivo, está cerrado herméticamente por un diafragma de caucho que descansa sobre una placa de metal perforada. Por su parte, el cierre del depósito superior se realiza mediante una válvula deslizante de doble asiento que aísla perfectamente el sistema de la atmósfera.

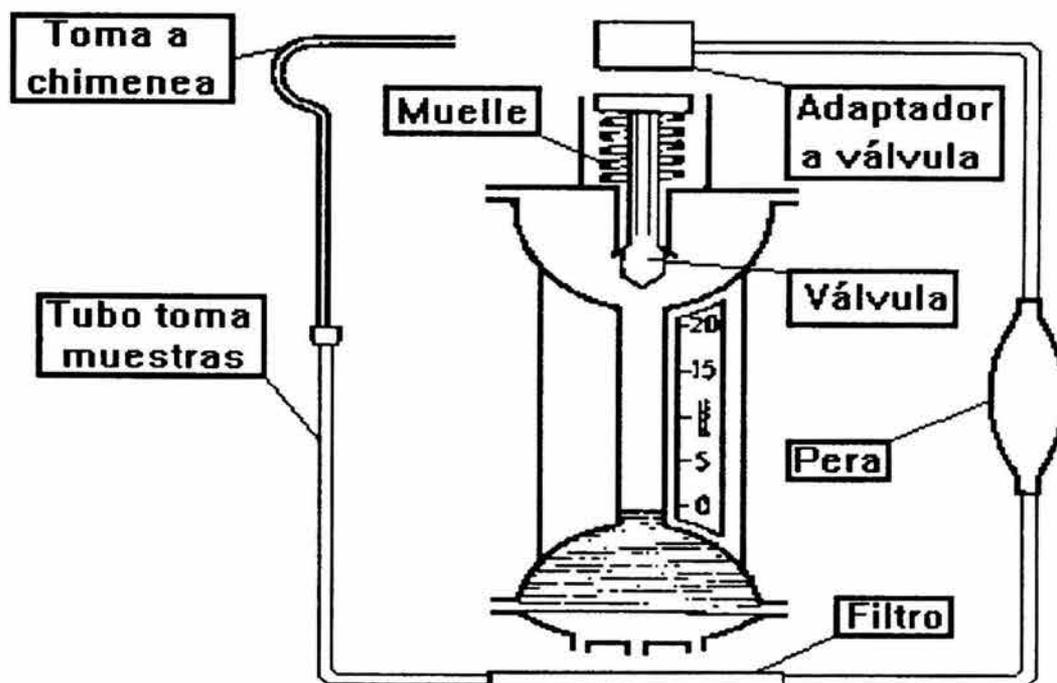


Figura III.2 Analizador de gases FYRITE

Para realizar un análisis con el FYRITE, se introduce uno de los extremos del tubo toma / muestras en el conducto de humos, mientras se apoya el otro en la válvula de doble asiento, con lo que ésta última descende, permitiendo el acceso de los humos al depósito superior, pero cerrando a su vez al tubo central, con lo que continúa aislado del exterior el resto del aparato. A continuación, mediante el accionamiento de una pera de la que va provisto el tubo toma / muestras, se bombean los humos al interior del depósito superior. Terminada la operación, se retira el tubo toma / muestras, con lo que la válvula de doble asiento vuelve a su posición inicial, quedando la muestra

de humos encerrada en el depósito superior.

A continuación se realiza el análisis, invirtiendo para ello repetidas veces el aparato, lo que obliga a la muestra a borbotear a través del absorbente. Al volver finalmente el aparato a su posición normal, la absorción producida creará una depresión en el depósito superior que obligará al diafragma de caucho a contraerse, elevando el líquido por el tubo central hasta un nivel determinado para el que se reestablecerá el equilibrio de presiones y al que corresponderá una disminución porcentual de volumen que puede leerse directamente en la escala.

El aparato FYRITE está diseñado para trabajar sin problemas con temperaturas de humos de hasta 450 °C. Para utilizarlo a temperaturas superiores debe incorporarse al mismo un sistema de refrigeración adecuado. Existen dos aparatos diferentes, con reactivos distintos, para la determinación de los contenidos de CO₂ y O₂ de los humos.

II.IV OPACIDAD DE LOS HUMOS

El contenido en hollín de los humos se mide por su opacidad, cuya determinación se efectúa normalmente por medio del ensayo Ringelman, de realización muy sencilla. Consiste en situar a un observador a unos 15 metros de distancia de una serie de rejillas, numeradas del 1 al 4 por orden creciente de opacidad (Figura III.3), comparando el color de los humos que salen por la chimenea con el de las distintas rejillas de la serie y atribuyéndoles el número de la que más se les asemeje.

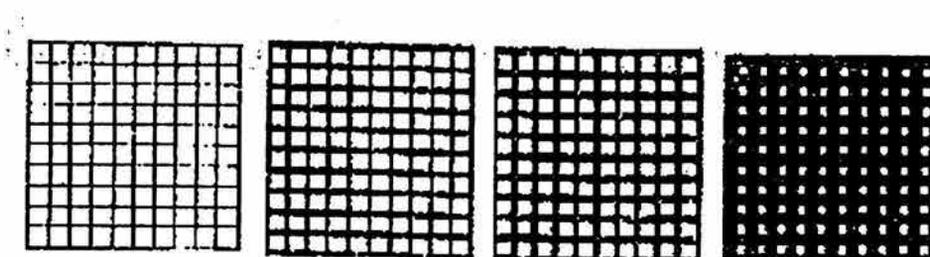


Figura III.3 Escala Ringelman

El ensayo Ringelman ha de realizarse necesariamente al exterior de la instalación y con luz diurna, por lo que sus resultados se verán afectados, entre otros factores, por la luminosidad del día. Por ello se prefiere, cuando la chimenea es accesible, realizar otro tipo de ensayos en los que se parte de muestras tomadas en la base de la misma.

El más sencillo de ellos es el Bacharach, en el que la toma de muestras se efectúa mediante una bomba de émbolo que aspira los humos un determinado número de veces a través de un filtro. Terminado el ensayo, se compara su aspecto, con el de una serie de patrones de referencia (Figura III.4), atribuyéndoles el número del que entre ellos más se le asemeje.

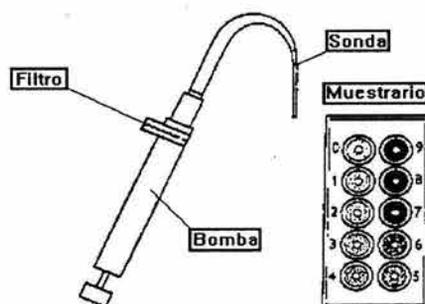


Figura III.4 Escala Bacharach

II.V ANALISIS CONTINUO DE LOS HUMOS

En las grandes instalaciones se analizan continuamente los gases de combustión, registrándose además los resultados obtenidos. La línea de toma de muestras debe siempre disponer de purgas para separar el vapor de agua en ella condensado y de un filtro para eliminación de partículas.

Las determinaciones se realizan normalmente para conocer el contenido en CO_2 , O_2 y componentes combustibles de los humos, realizándose normalmente por los siguientes métodos.

II.VI REGISTRADORES DE CO_2

Los sistemas basados en la absorción en potasa succionan los humos de la base de la chimenea durante la carrera ascendente de un pistón, movido alternativamente en el interior de un cilindro por un motor eléctrico. En la carrera descendente de dicho pistón, éste envía los humos a una campana de medición a través de una solución de potasa en la que el CO es absorbido. Como el desplazamiento de tal campana es proporcional al volumen de humos que recibe, la determinación del contenido en CO_2 de éstos es inmediata, registrándose a continuación el resultado obtenido. Terminada la medición, el gas contenido en la campana es expulsado a la atmósfera.

II.VII ANALIZADORES POR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los aparatos de este tipo están basados en el hecho de que tal propiedad física tiene valores similares, para el CO_2 y H_2 , que son, a su vez, inferiores en un 50% aproximadamente a los correspondientes al O_2 y N_2 . Por ello, cuando se hace pasar una muestra de humos secos a través de una de las resistencias de un puente de Wheatstone, se producirá una descompensación del mismo que estará, directamente relacionada con el contenido en CO_2 de los humos, el cual se determina y registra a continuación.

El sistema, por otra parte, permite conocer el contenido en CO y H_2 de los humos de la combustión, puesto que si éstos, tras atravesar el puente de Wheatstone, se hacen pasar a través de platino al rojo, se producirá la oxidación total a CO_2 y H_2O del CO y H_2 en ellos contenido.

Haciendo pasar ahora los humos resultantes a través de un segundo analizador de CO_2 , la diferencia entre las dos determinaciones permitirá conocer el contenido en $\text{CO} + \text{H}_2$ de los humos de la combustión, registrándose el resultado obtenido.

II.VIII REGISTRADORES DE O_2

En la actualidad se utiliza normalmente el contenido en oxígeno de los humos como medida aproximada del exceso de aire con el que está trabajando una instalación.

La mayoría de los registradores industriales de oxígeno utilizan sus propiedades magnéticas para efectuar tal medición. Tanto el oxígeno como el óxido nítrico son sustancias paramagnéticas, mientras son diamagnéticos los restantes productos de la combustión. Como el contenido en óxido nítrico de los humos es extremadamente reducido, tal diferencia de propiedades magnéticas puede ser utilizada para medir el contenido en oxígeno de los humos con exactitud.

La determinación puede realizarse, por ejemplo, haciendo circular los gases de combustión a través de un anillo hueco en cuyo interior se coloca en posición central un tubo longitudinalmente dispuesto a lo largo del conducto de humos. Sobre dicho tubo van arrolladas dos bobinas iguales de resistencias de platino, calentadas eléctricamente y que constituyen dos ramas del circuito de un puente de Wheatstone.

Si a una de tales bobinas se la somete a un intenso campo magnético, el gas que contiene oxígeno avanzará por el tubo calentándose, con lo que disminuirá la temperatura de la primera bobina. Ello provocará una descompensación en el circuito del puente de Wheatstone que será proporcional al

contenido en oxígeno de los humos, que se mide y registra si fuera preciso.

II.IX DIAGRAMAS DE COMBUSTION

Los diagramas de combustión se utilizan normalmente para determinar con rapidez, a partir del análisis de humos, el valor del coeficiente n de exceso de aire con el que está trabajando una instalación. A continuación se exponen los fundamentos y cálculo de los de uso más frecuente.

II.IX.I Recta de Grebel

Cuando para caracterizar las combustiones se utiliza un sistema de representación en el que figuran en abcisas y ordenadas los contenidos en O_2 y CO de los humos secos producidos, los puntos representativos de la totalidad de combustiones completas de un mismo combustible quedan situados sobre una recta que se conoce con el nombre de recta de Grebel.

Para determinar la ecuación de la citada recta, se parte del hecho de que el número de metros cúbicos de CO_2 generados en la combustión de la unidad de combustible es constante, cualquiera que sea el exceso de aire con el que se trabaja. En consecuencia, se tendrá:

$$Y V_r = K V_t \quad (1)$$

donde K representa, en tanto por uno, el contenido en CO_2 de los humos de la combustión teórica, cuyo valor puede calcularse, conocida la composición del combustible, por cualquiera de los métodos anteriormente expuestos. V_t y V_r representan, por su parte, los volúmenes de humos correspondientes a las combustiones teórica y real, respectivamente Y el contenido en CO_2 de los humos de esta última, expresado asimismo en tanto por uno.

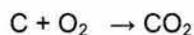
Al tratarse de combustiones completas se tendrá que:

$$V_r = V_t + (n - 1) \quad (2)$$

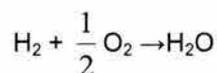
Por lo que, teniendo en cuenta (19), resultará:

$$Y [V_t + (n - 1) A_t] = K V_t \quad (3)$$

Cuando el combustible está compuesto únicamente de carbono, su combustión sucede conforme a la ecuación:



por lo que los volúmenes de aire y humos, A_t y V_t , coincidirán exactamente. Esto deja de ser cierto cuando el combustible contiene hidrógeno, en primer lugar porque en la reacción de combustión de este elemento:



se generan el doble de metros cúbicos de vapor de agua que los de oxígeno consumidos y, además, por que la determinación de la composición de los humos, se realiza sobre estos en estado seco.

Sin embargo, cuando el contenido en hidrógeno del combustible es reducido, como sucede con los carbones y fuelóleos, puede estimarse, sin cometer error apreciable, que ambos valores son iguales, es decir, que $A_t = V_t$.

Aceptando tal hipótesis la ecuación (3) resultará ser:

$$Y * n = K$$

y, por tanto,

$$n = \frac{k}{Y} = \frac{\%(\text{CO})_t}{\%(\text{CO})_r} \quad (4)$$

expresión que proporciona un método directo y rápido para el cálculo del exceso de aire con el que está trabajando una instalación, pero que es únicamente aplicable a los combustibles citados.

Por otra parte, y también cuando se trate de combustiones completas, el volumen de O_2 correspondiente al exceso de aire coincide con el existente en los productos de la combustión, teniéndose entonces que:

$$X V_r = 0.21 (n - 1) A_t \quad (5)$$

donde X representa, en tanto por uno, el contenido en O_2 de los humos de la combustión. Sustituyendo (2) en (5) resultará:

$$X [V_t + (n - 1) A_t] = 0.21 (n - 1) A_t$$

que, aceptando la hipótesis establecida como válida para carbones y fuelóleos, de que $A_t = V_t$ se transformará en:

$$nX = 0,21 (n - 1)$$

Expresión de la que, entrando con (4), se obtiene:

$$\frac{k}{Y} X = 0.21 \left[\frac{k}{Y} - 1 \right]$$

y de aquí:

$$Y = - \frac{k}{0.21} X + k \quad (6)$$

que es la ecuación de la recta de Grebel, cuya representación gráfica (Figura III.5) es inmediata al conocerse dos puntos de la misma. El A (O,K) que corresponde a la combustión teórica y el B (0.21 , O) a la realizada con un exceso de aire infinito. Entre ambos puntos se encontrarán el resto de combustiones, para las que el exceso de aire empleado irá aumentando progresivamente al desplazarse desde A hacia B.

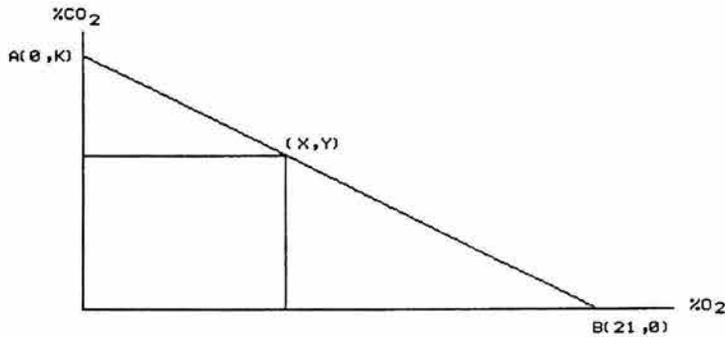


Figura III.5 Recta de Grebel

II.IX.II Diagrama de Bunte

Si el sistema de representación anterior se sustituye por otro en el que figura en abscisas la suma (CO₂ + O₂) de contenidos de anhídrido carbónico y oxígeno de los humos y en ordenadas el contenido en CO₂ de los mismos la totalidad de combustiones completas de un mismo combustible continuarán situadas sobre una recta, cuya ecuación en el nuevo sistema de coordenadas resultará de sustituir X por (X - Y) en la ecuación de la recta de Grebel anteriormente calculada. Se tendrá así que:

$$Y = \frac{-k}{0.21} (X - Y) + k$$

o su equivalente:

$$(0.21 - K)Y = K(0.21 - X) \quad (7)$$

Esta recta se representa fácilmente por conocerse dos puntos de la misma (Figura 6), el A (K , K) sobre la diagonal, que corresponde a la combustión teórica y el B (0,21,0) a la realizada con un exceso de aire infinito. Anotando sobre ella los excesos de aire que corresponden a los distintos puntos de la misma y que van aumentando progresivamente desde A (n = 1) hasta B (n = ∞), se obtendrá el denominado diagrama de Bunte (Figura III.6) mediante el cuál puede determinarse, para un combustible determinado y conocido el % CO₂ de los humos de una combustión cualquiera, el contenido en O₂ de los mismos y el valor del coeficiente n de exceso de aire con el que está trabajando la instalación.

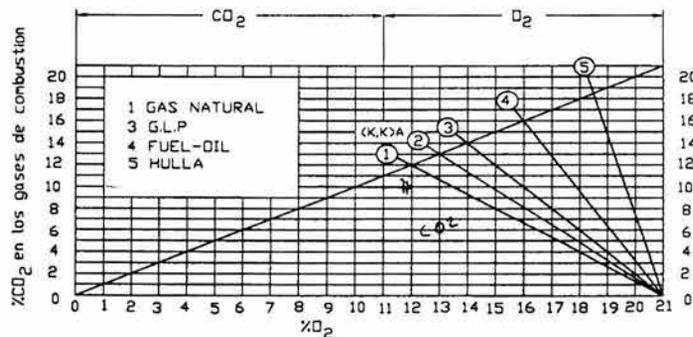


Figura III.6 Diagrama de Bunte

II.IX.III DIAGRAMA DE OSTWALD

Los diagramas anteriormente estudiados pueden utilizarse únicamente para la determinación del coeficiente n de exceso de aire de las combustiones completas. Pero muy frecuentemente en la práctica tal hecho no se produce, bien sea por un deficiente control del proceso o por características propias del mismo. Por ello es necesario disponer siempre de un diagrama en el que figuren representadas la totalidad de las combustiones que pueden derivarse de un mismo combustible. De tales diagramas el de uso más extendido es el de Ostwald, del que seguidamente se exponen las bases matemáticas para su representación.

Supóngase para ello que el combustible a estudiar se quema con cierta cantidad de aire, obteniendo como resultado de tal combustión un volumen V_i de humos cuyo contenido en CO es (expresado en tanto por uno). Imagínese que, realizada dicha combustión, se extrae de los humos el volumen de aire utilizado en exceso, esto es $(n - 1) A_T$ cuando $n > 1$, o se aporta a estos el que sea preciso para completar su combustión, es decir $(1 - n) A_T$ cuando $n < 1$. Resultará así para el volumen de los humos obtenidos tras esta imaginaria operación el valor siguiente:

$$V = V_i - (n - 1) A_T$$

Si una vez realizada la anterior operación se completa la oxidación de los componentes combustibles de los humos, se producirá la combustión teórica del combustible, dados los supuestos establecidos. Ahora bien, la oxidación del CO contenido en los humos se produce según la reacción:



por lo que, por cada volumen de CO_2 formado a partir del CO de los humos, habrá desaparecido de ellos, medio volumen de O_2 . En consecuencia alcanzada la combustión teórica, el volumen V_T de los humos resultantes vendrá dado por la expresión:

$$V_T = \left(V_i - \frac{\lambda}{2} V_i \right) - (n - 1) A_T \quad (8)$$

Como, por otra parte, la suma de volúmenes de $\text{CO}_2 + \text{CO}$ de los humos será constante, cualquiera que sea el tipo de combustión realizado, se tendrá que:

$$K V_T = (Y + \lambda) V_i \quad (9)$$

en donde K , Y representan el tanto por uno de CO_2 en los humos de las combustiones teórica y real, respectivamente, siendo la primera de ellas una característica propia del combustible.

El volumen de oxígeno existente en los humos tras la combustión inicial será de $X V_i$, donde X representa el contenido en oxígeno de éstos, en tanto por uno. Por tanto, el restante tras la operación imaginaria de ajuste de aire será:

$$X V_i - 0.21 (n - 1) A_T$$

Este oxígeno reaccionará en su totalidad con el CO existente en los humos de la combustión inicial para transformarse en CO_2 . Como la transformación se produce según la ecuación:



podrá escribirse:

$$\lambda V_i = 2 [X V_i - 0.21 (n - 1) A_T]$$

o lo que es igual:

$$\lambda V_i = 2 X V_i - 0.42 (n - 1) A_T \quad (10)$$

Las ecuaciones (8) , (9) y (10) permiten relacionar los contenidos en CO_2 (Y) y O_2 (X) de los gases de combustión de un combustible determinado Con el CO (λ) contenido en los mismos y con el coeficiente n de exceso de aire. Así, disponiendo las igualdades (28) y (29) de la forma:

$$\frac{V_T}{V_i} = \frac{Y + \lambda}{K} \quad \text{y} \quad \frac{A_T}{V_i} = \frac{2X - \lambda}{0.42(n-1)}$$

y entrando con tales valores en (8) , donde se habrán dividido previamente por V_i sus dos miembros, se tendrá:

$$\frac{Y + \lambda}{K} = 1 - \frac{\lambda}{2} - (n-1) \frac{2X - \lambda}{0.42(n-1)}$$

o lo que es igual:

$$\frac{Y + \lambda}{K} = 1 - \frac{\lambda}{2} - \frac{2X - \lambda}{0.42}$$

y de aquí:

$$Y = -\frac{K}{0.21} X + (1.88K - 1)\lambda + K \quad (11)$$

Esta ecuación, que expresa la relación existente entre los contenidos en CO_2 (Y) y O_2 (X) de los gases de combustión para distintos valores de λ (tanto por uno de CO), representa una familia de rectas paralelas, cuyo coeficiente angular es de $-\frac{K}{0.21}$ (Figura III.7). A cada valor de λ corresponderá una recta de la familia en la que figurarán agrupadas todas las combustiones que contengan igual proporción de CO en los humos.

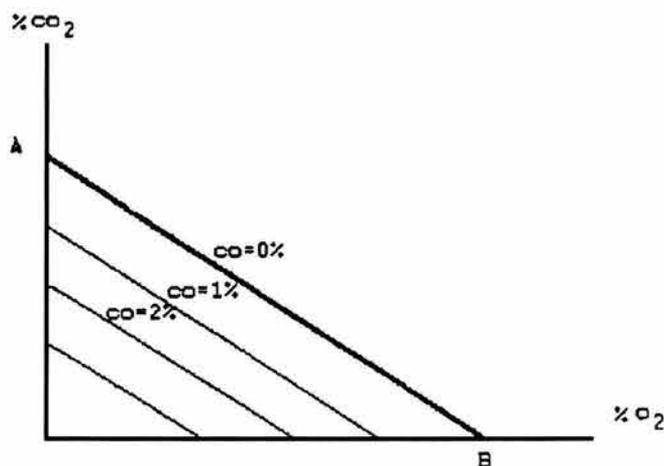


FIGURA III.7 Relación entre CO_2 y O_2

Rectas $\text{CO} = \text{Cte}$

Para $\lambda = 0$, la ecuación (11) se transforma en la :

$$Y = -\frac{K}{0.21}X + K$$

que corresponde a la recta de Grebel del combustible.

Expresando ahora las ecuaciones(9) y (10)de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}(y + \lambda) V_i &= K V_T \\ (2X - \lambda) V_i &= 0.42 (n - 1) A_T\end{aligned}$$

y sumándolas miembro a miembro, se obtendrá:

$$(Y + 2X) V_i = K V_T + 0.42 (n - 1) A_T$$

y de aquí :

$$V_i = \frac{K V_T + 0.42(n - 1) A_T}{Y + 2X} \quad (12)$$

Como de la ecuación (28) se deduce asimismo que :

$$\lambda V_i = K V_T - Y V_i$$

al efectuar en el segundo miembro de esta igualdad la sustitución de V_i por su valor calculado en (12) se obtendrá :

$$\lambda V_i = K V_T - Y \frac{K V_T + 0.42(n - 1) A_T}{Y + 2X}$$

o lo que es igual :

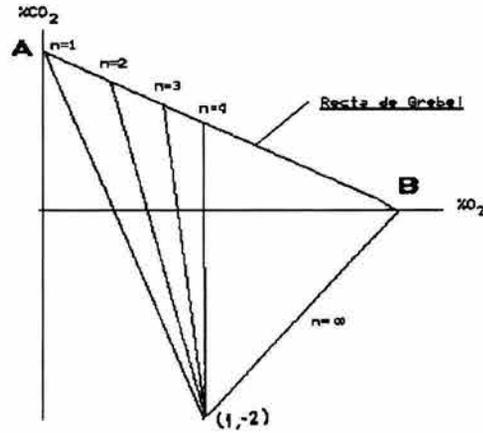
$$\lambda V_i = \frac{2K V_T X - 0.42(n - 1) A_T Y}{Y + 2X} \quad (13)$$

Introduciendo ahora en la ecuación (8) los valores obtenidos en (12) y (13) y operando resulta:

$$Y = \frac{(K + 2)V_T + 2(n - 1)A_T}{V_T + 0.79(n - 1)A_T} X + \frac{K V_T + 0.42(n - 1)A_T}{V_T + 0.79(n - 1)A_T} \quad (14)$$

que es la ecuación de una segunda familia de rectas (Figura III.8), cada una de las cuales agrupa las combustiones realizadas con igual exceso o defecto de aire. A diferencia de las rectas pertenecientes a la primera familia, éstas no son paralelas, pues su coeficiente angular varía con n .

Sin embargo todas ellas convergen en un sólo punto, de coordenadas $(1, -2)$, situado muy lejos de los ejes del diagrama, por lo que parecen paralelas al observarlas en él.

Figura III.8 Rectas $n = Cte$

Evidentemente, cada combustible dispondrá de un diagrama de Ostwald diferente. En la Figura III.9 se muestra el correspondiente al combustible No. 1 suministrado por CAMPSA .

Para la utilización del diagrama de Ostwald se comienza por determinar el contenido en CO_2 y O_2 de los humos mediante un aparato Orsat o similar, situando a continuación sobre el diagrama el punto al que corresponden tales coordenadas. Este quedará normalmente colocado entre dos rectas consecutivas de cada una de las familias, bastando en consecuencia con una simple interpolación para obtener los valores del coeficiente n de exceso de aire y del contenido en CO de los humos secos de la combustión analizada .

Conviene señalar que, en el supuesto estudiado, el único componente combustible de los humos era el CO , lo que puede aceptarse en la práctica sin cometer error apreciable cuando se utilizan combustibles tales como el carbón o el combustóleo, para los que la relación C / H es elevada.

Cuando se queman combustibles de alto contenido en hidrógeno, cual es el caso de la mayoría de los gases, tal suposición es incorrecta, pues aparecen $CO + H_2$ en los humos de las combustiones incompletas. En tales casos el diagrama de Ostwald debe corregirse, sustituyéndolo por otro en el que las rectas de la primera familia correspondan a combustiones para las que $CO + H_2 = Cte$.

Resultan de este modo diagramas similares al estudiado, de los que el más conocido es el de Keller.

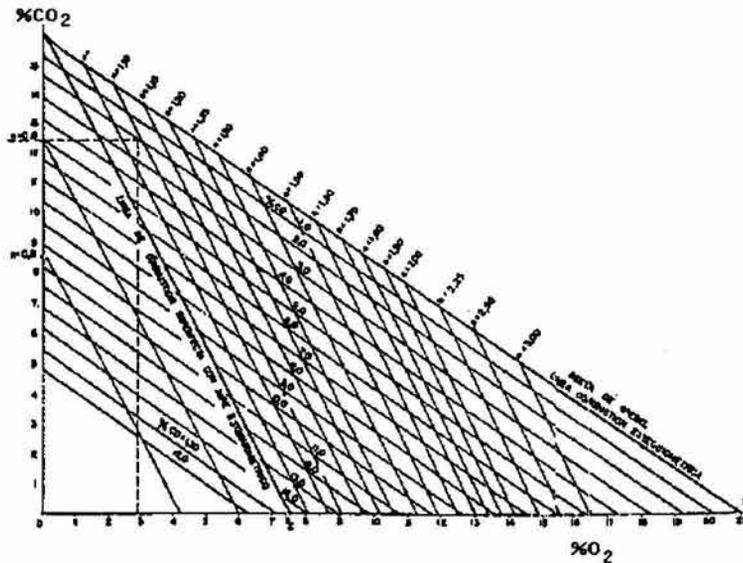


FIGURA III.9 Diagrama de Ostwald

En el diagrama de Ostwald de cualquier combustible se distinguen las siguientes regiones (Figura III.10):

- ✓ Interior del triángulo AOB .- En él están representadas todas las combustiones incompletas ($n < 1$)
- ✓ Recta AB .- En ella se representan todas las combustiones realizadas con el aire teórico ($n = 1$), de las que sólo es completa la del punto A, que corresponde a la teórica. El resto son imperfectas, conteniendo CO los humos producidos en ellas.
- ✓ Interior del triángulo ABC .- En él están representadas todas las combustiones imperfectas ($n > 1$)
- ✓ Recta AC .- En ella se representan todas las combustiones completas correspondiendo por tanto, a la recta de Grebel del combustible. El punto A representa la combustión teórica ($n = 1$) y el C la realizada con un exceso infinito de aire ($n = \infty$).

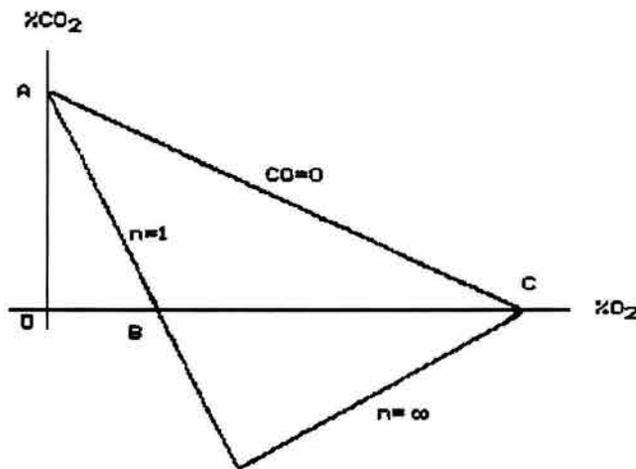


FIGURA III.10 Regiones Diagrama Ostwald

Anexo III

Trenes de válvulas de gas recomendados

Esta guía tiene intención de servir únicamente como referencia a los trenes de válvulas de gases requeridos ó recomendados por las agencias aprobatorias, corporaciones de códigos y aseguradoras. Los trenes de gases ilustrados en las figuras 1 a 6 satisfacen y algunas veces exceden los requerimientos mínimos de cualquier organización. Los requerimientos ó recomendaciones ilustrados son actuales a la fecha de publicación.

1. Seleccione (de la lista siguiente) la agenda aprobatoria, corporación técnica o asegurador cuyos requerimientos ó recomendaciones necesitan ser cumplidas.
2. Seleccione el rango de entrada apropiado (piloto principal) para el quemador.
3. Nótese que el número que sigue al rango de entrada indica en número de la figura que ilustra los componentes y tubería típicos para el rango en particular.

ÍNDICE < = menor que; > = mayor que

ANSI Z83.3 Equipo que Utiliza Gas en Calderas Grandes.

400,000-2500,000	Btu/h	Fig.6
2,500,000-5,000,000	Btu/h	Fig.4
5,000,000-12,500,000	Btu/h	Fig.5

ASME CSSD-1: Dispositivos de Control y Seguridad para Calderas Encendidas Automáticamente.

400,000-2,500,000 Btu/h	Fig.3
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig.4
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig.5

ANSI Z21.13 Calderas Encendido por Gas, de Vapor de Baja Presión y de Agua Caliente.

<400,000 Btu/h	Fig.3
400,000-2,500,000 Btu/h	Fig.3
2,500,000-12,500,000 Btu/h	Fig.3
	Fig.5

Sistemas Factory Mutual: 6-4, 6-4R; Quemadores Sencillos para Calderas Alimentadas por Combustible y Gas

400,000-2,500,000 Btu/h	Fig.4
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig.4
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig.5
>12,500,000 Btu/h	Fig.1

Aseguradores de Industrial Risk (IRI)

>400,000 Btu/h	Fig.1
----------------	-------

Risk Mutual Mejorado

Piloto <250,000 Btu/h, principal	
<1,000,000 Btu/h	Fig.3
Piloto <250,000 Btu/h, principal	
>1,000,000 Btu/h	Fig.2
Piloto >250,000 Btu/h, principal	
'1,000,000 Btu/h	Fig.1

Grupo Kemper

1,000,000-10,000,000 Btu/h	Fig.2
>10,000,000 Btu/h	Fig.1

NFPA 8501: Operación de un sólo Quemador para Caldera

>12,500,000 Btu/h	Fig.1
-------------------	-------

UL 795: Equipo para Calefacción con gas para Aplicaciones Comerciales e Industriales

<2,500,000 Btu/h	Fig.4
2,500,000-5,000,000 Btu/h	Fig.4
5,000,000-12,500,000 Btu/h	Fig.5
>12,500,000 Btu/h	Fig.2

Servicios Aprobatorios Internacionales (CGA/AGA)

CGA-3. 1: Grupo de Calderas de Paquete Industriales y Comerciales Alimentadas por Gas
 CGA-3.2: Grupo de Calderas de Paquete Industriales y Comerciales Alimentadas por Gas.
 CGA-3.3: Calderas Industriales y Comerciales Diseñadas para Gas, Alimentadas Atmosféricamente, con Chimenea Vertical

NOTA: Los componentes de tren de gas, su funcionalidad y disposiciones de la tubería requeridos para estos estándares varían dependiendo de la presión del gas (inmediatamente aguas abajo del regulador de presión). Consulte los estándares individuales para información específica.

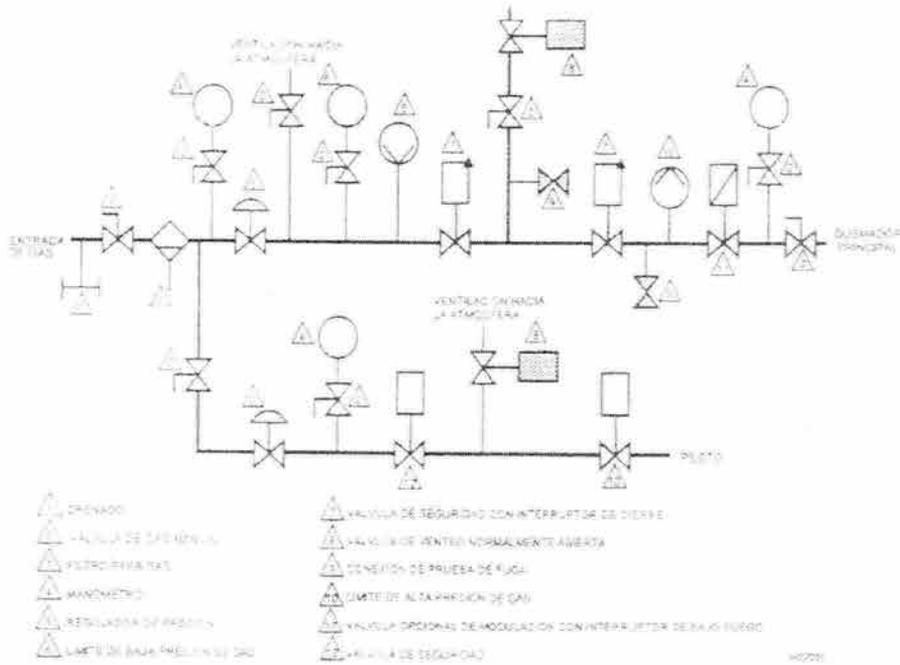


Fig.1

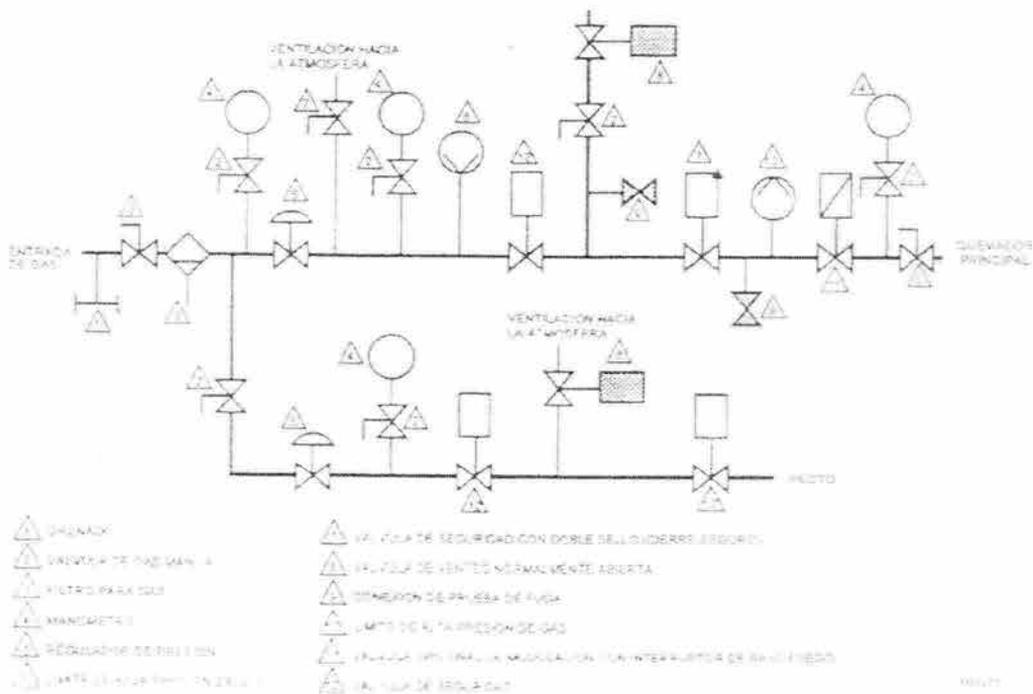


Fig.2

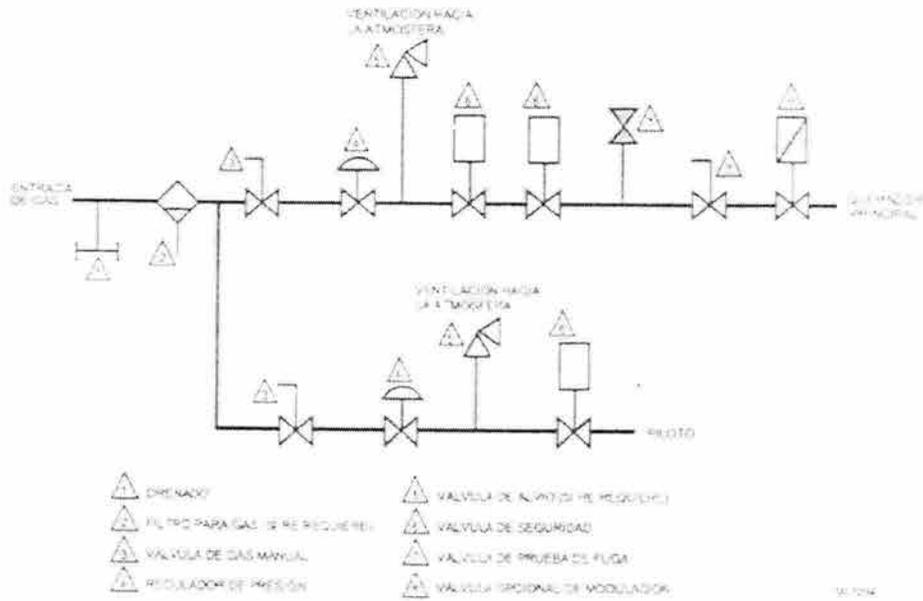


Fig.3

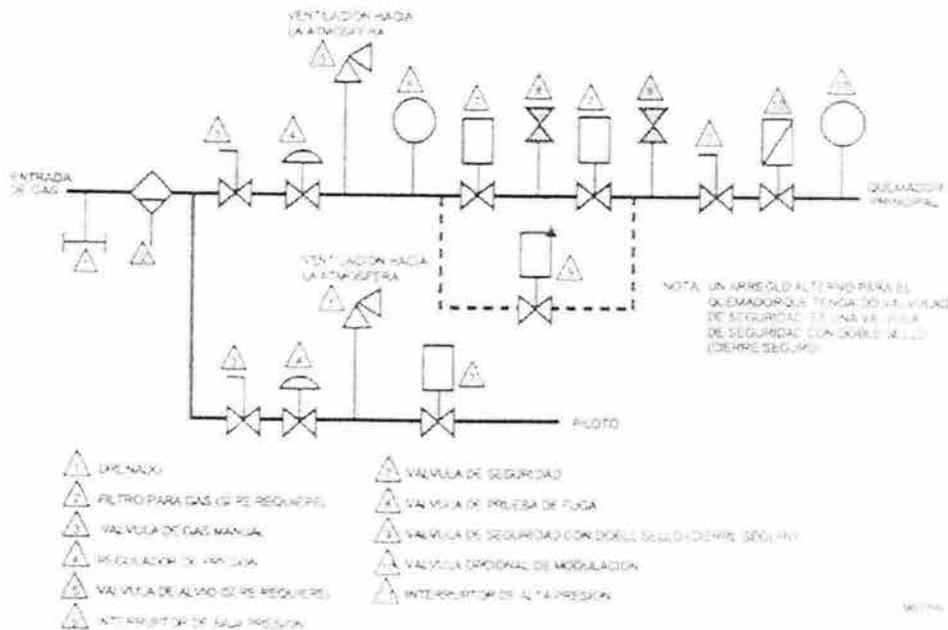


Fig.4

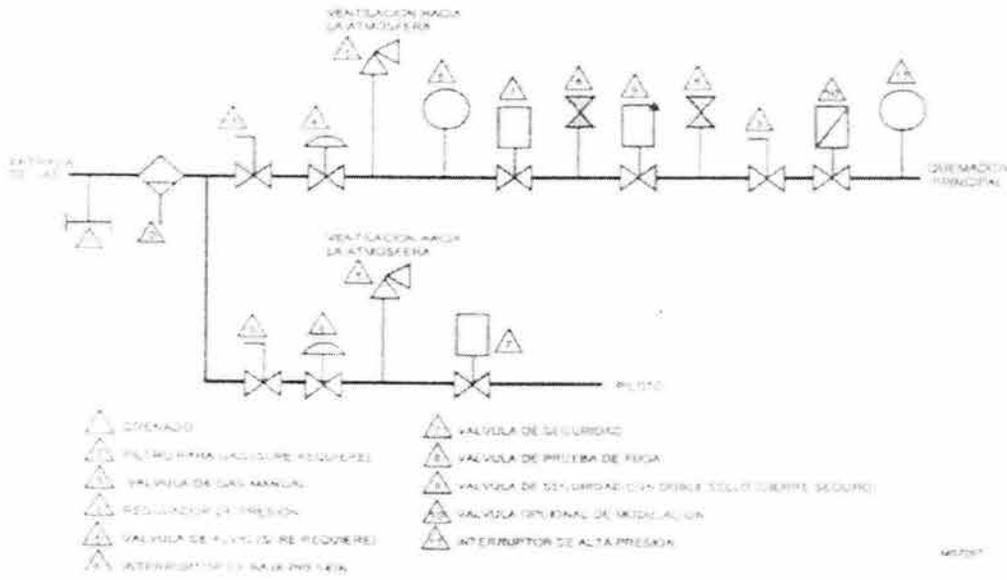


Fig.5

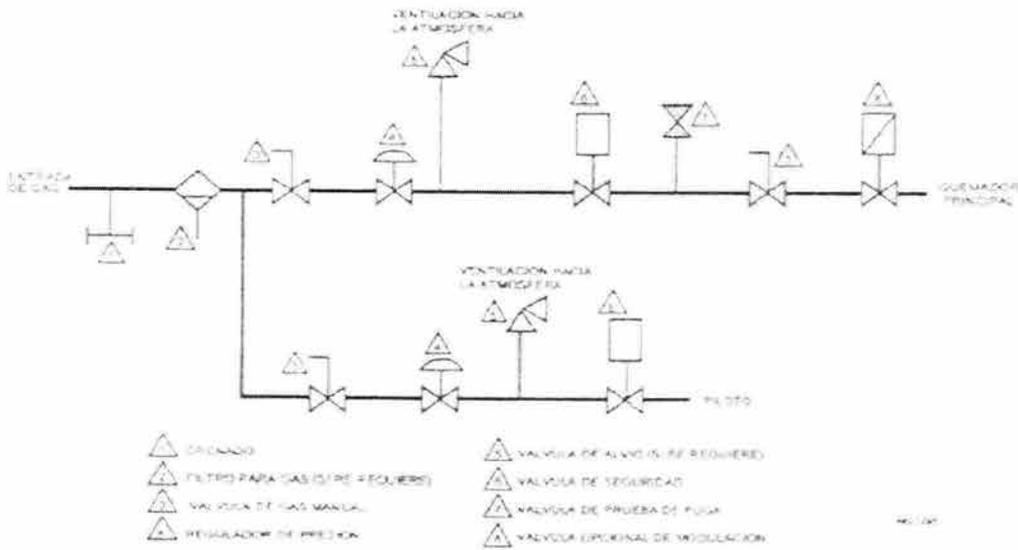


Fig.6

BIBLIOGRAFÍA

1. Babcock and Wilcox. Combustion, its generation and use. 1978
2. Borman L. Gary. Ragland W. Kenneth Combustion engineering Ed. McGraw-Hill 1998
3. Colman, J.P. Métodos Experimentales para Ingenieros, México, Ed. McGraw-Hill, 1978.
4. Desantes F. José. Lapuerta A. Magín Fundamentos de combustión Ed. Universidad Politécnica de Valencia 1991
5. Faires Moring, Virgil. Termodinámica, 2ª ed., México. Unión Tipografía. Ed. Hispano Americana
6. Figueroa Cárdenas, Agustín. Gustavo Manzanares Hernandez. Manual de Laboratorio de la Unidad de combustión, Tesis E.N.E.P. Aragón, México 1985.
7. Hernández Goribar Et. Al. Prácticas del Laboratorio de Máquinas Térmicas, 1ª ed., México. Ed. FI
8. Heywood B. John Internal combustion engine fundamentals Ed. McGraw-Hill 1998
9. Hilton Company. Manual de instalación de la Cámara de Combustión Hilton C492
10. Márquez M. Manuel. Combustión y quemadores. Ed Marcombo, España. 1989
11. Salvi, Giuliano. La Combustión, Teoría y Aplicaciones, 2ª ed., Madrid, España. Ed. Dossat, S.A.
12. Sánchez Flores, Alfredo. Combustión y Contaminación, 1ª ed., 1997 México. Ed. SEPI-ESIME
13. Smoot L. Douglas. Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use Ed. Elsevier Amsterdam 1993
14. Van Wylen, Gordon J, Fundamentos de Termodinámica, 1ª ed. México, Ed. Limusa, S.A., 1977.
15. Zink, John. Handbook Combustion. Ed John Zink 2002