

31
205



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA COMBUSTIÓN
DE COMBUSTÓLEO EN LECHO
FLUIDIZADO CIRCULANTE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

RICARDO DÍAZ RANGEL



México, D.F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Prof. GONZÁLEZ ARREDONDO LETICIA MA. DE LOS A.
Vocal: Prof. GARCÍA CHARRETÓN ALMA ROSA
Secretario: Prof. MILÁN FORESSI JULIO JOSÉ
1er. suplente: Prof. TORRES BARRERA RODOLFO
2do. suplente: Prof. PÉREZ CAMACHO MARIANO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.
EDIFICIO 34.
TEMIXCO, MORELOS.

ASESOR DEL TEMA:

I.Q. JULIO JOSÉ MILÁN FORESSI



SUSTENTANTE:

RICARDO DÍAZ RANGEL



DEDICATORIA

A Dios por permitirme experimentar esta aventura llamada vida.

A mis padres: Irma y Armando.

Por brindarme el amor más puro y abnegado.

Por su apoyo incondicional.

Por su motivación.

Por todo lo que soy.

Gracias.

A mi papi: Ricardo Rangel Sánchez.

Por ser mi guía y ejemplo en la vida.

A mi mami: Beatriz González Solórzano.

Por iluminar mi vida con su amor y apoyo.

A mis hermanos: Mónica y Juan.

Por brindarme su cariño, alegría y confianza.

A mis abuelitos: Tomasa y Lino.

Por su amor y cariño.

AGRADECIMIENTOS

Al I.Q. Julio J. Milán Foressi por su excelente dirección en la realización de este trabajo.

Al M. en C. Ismael Rojas Hidalgo por las recomendaciones y comentarios aportados al presente trabajo.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas, particularmente al Departamento de Ingeniería Mecánica.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Química.

Al técnico Gregorio Pérez Flores por su valiosa participación en este trabajo.

Contenido.

Lista de tablas.	i
Lista de figuras.	ii
Introducción.	1
Capítulo 1.	
Fenómeno de fluidización.	
1.1. Antecedentes teóricos.	3
1.2. Tipos de fluidización.	6
1.3. Aplicaciones.	10
Capítulo 2.	
Combustión.	
2.1. Proceso químico.	11
2.1.1. Tipos de combustión.	11
2.1.2. Clasificación de las flamas.	12
2.1.3. Modelos de combustión.	14
2.1.3.1. Modelo de combustión envolvente.	14
2.1.3.2. Modelo de combustión de estela o heterogénea.	16
2.2. Proceso físico.	16
2.2.1. Quemadores.	16
2.2.2. Atomizadores.	18
2.3. Combustibles.	19
2.3.1. Características de los combustibles.	19
2.3.2. Principales combustibles para calderas empleados en México.	22
2.4. Contaminación.	25
2.4.1. Contaminación por fuentes fijas de combustión.	25
2.4.2. Formación de óxidos de azufre en calderas.	25
2.4.3. Formación de óxidos de nitrógeno en calderas.	28

2.4.4. Formación de monóxido de carbono en calderas.	28
2.4.5. Lluvia ácida.	28
2.4.6. Problemas originados por la presencia de bióxido de azufre en la biosfera.	29
2.4.7. Problemas originados por la presencia de óxidos de nitrógeno en la atmósfera y en la biosfera.	29
2.4.8. Problemas originados por la presencia de óxidos de carbono en la atmósfera y en la biosfera.	30

Capítulo 3.

Combustión en lecho fluidizado.

3.1. Proceso químico.	31
3.2. Proceso físico.	31
3.2.1. Variables que influyen en el proceso de combustión en lecho fluidizado.	31
3.2.2. Temperatura del lecho.	32

Capítulo 4.

Calderas de lecho fluidizado.

4.1. Clasificación,	33
4.2. Calderas de lecho fluidizado atmosférico burbujeante.	33
4.3. Calderas de lecho fluidizado atmosférico circulante.	35
4.4. Calderas de lecho fluidizado presurizado.	38
4.5. Comparación entre las calderas de lecho fluidizado burbujeante y circulante.	38
4.6. Ventajas sobre los sistemas de combustión convencionales.	39
4.7. Desventajas.	41

Capítulo 5.

Descripción del equipo experimental.

5.1. Combustor de lecho fluidizado circulante del I.I.E.	42
5.2. Secciones del combustor de lecho fluidizado circulante.	42

Capítulo 6.

Experimentación.

6.1. Trabajo experimental.	53
6.1.1. Caracterización del material del lecho.	53
6.1.2. Pruebas realizadas.	54
6.1.3. Parámetros calculados.	56
6.1.3.1. Flujo de combustóleo.	56
6.1.3.2. Exceso de aire.	56
6.1.3.3. Flujo de aire.	56
6.1.3.4. Velocidad de fluidización (referida al aire).	57
6.1.3.5. Relación Ca/S.	57
6.1.3.6. Concentración de SO ₂ normalizada al 5 % de O ₂ .	57
6.1.3.7. Porcentaje de SO ₂ retenido en el lecho.	57
6.1.4. Procedimiento de arranque y paro.	58
6.1.4.1. Procedimiento de arranque.	58
6.1.4.2. Procedimiento de paro.	59
6.1.5. Análisis estadístico de los datos experimentales.	60
6.1.6. Concentración máxima permisible de bióxido de azufre en los gases de combustión.	60
6.2. Resultados experimentales.	61
6.2.1. Resultados obtenidos de las pruebas de la serie 1.	61
6.2.2. Resultados obtenidos de las pruebas de la serie 2.	73

Capítulo 7.

Discusión de los resultados.

7.1. Factibilidad de la combustión de combustóleo en lecho fluidizado circulante.	83
7.2. Perfil de temperaturas en el combustor de lecho fluidizado circulante.	83
7.3. Emisiones de SO ₂ .	86
7.4. Emisiones de CO.	88
7.5. Válvula no mecánica de tipo "L".	88

Conclusiones y recomendaciones.	89
Nomenclatura.	91
Glosario de términos.	93
Referencias.	94
Apéndice A.	96
Apéndice B.	107

Lista de tablas.

Tabla 2.1. Valores estadísticos de las propiedades básicas de los combustóleos mexicanos.	24
Tabla 4.1. Comparación de las principales características de combustores de lecho fluidizado.	39
Tabla 6.1. Granulometría de la arena sílica.	53
Tabla 6.2. Granulometría del cero grueso (carbonato de calcio).	54
Tabla 6.3. Concentraciones máximas permisibles de bióxido de azufre (ppm en vol. y 5 % de O ₂).	60
Tabla 6.4. Emisiones de bióxido de azufre y relación Ca/S.	82

Lista de figuras.

Figura 1.1. Caída de presión vs velocidad del gas.	4
Figura 1.2. Tipos de fluidización.	7
Figura 1.3. Estela de la burbuja.	7
Figura 1.4. Zonas de un lecho fluidizado burbujeante.	7
Figura 1.5. Lecho fluidizado intermitente.	9
Figura 1.6. Lecho fluidizado turbulento.	9
Figura 1.7. Lecho fluidizado circulante.	9
Figura 2.1. Flama de premezcla.	13
Figura 2.2. Zonas de las flamas de difusión.	13
Figura 2.3. Esquema del modelo de combustión envolvente.	15
Figura 2.4. Combustión de estela.	17
Figura 2.5. Combustión del residuo carbonoso.	17
Figura 2.6. Quemador.	17
Figura 2.7. Atomizador.	18
Figura 2.8. Obtención del combustóleo.	23
Figura 2.9. Transformación del SO_2 en SO_3 en función de diferentes catalizadores y temperaturas.	27
Figura 4.1. Combustor de lecho fluidizado burbujeante.	34
Figura 4.2. Cambiador de calor de lecho fluidizado.	36
Figura 4.3. Remoción de calor en una caldera de lecho fluidizado atmosférico circulante.	37
Figura 5.1. Inyector de combustóleo.	44
Figura 5.2. Ventilador de tiro forzado.	45
Figura 5.3. Plato distribuidor y toberas.	45
Figura 5.4. Módulo 1 y 2.	45
Figura 5.5. Módulo 3 y 4.	47
Figura 5.6. Vista lateral del combustor.	47
Figura 5.7. Torre de enfriamiento de agua.	48

Figura 5.8. Cambiadores de calor.	48
Figura 5.9. Analizadores de gases.	48
Figura 5.10. Diagrama funcional del sistema de detección infrarroja.	50
Figura 5.11. Diagrama funcional del sistema paramagnético.	52
Figura 6.1. Secuencia de concentraciones SO ₂ (medidas y calculadas).	72
Figura 7.1. Secuencia de mediciones de la temperatura del lecho.	84
Figura 7.2. Perfil de temperaturas.	85
Figura 7.3. Emisiones de bióxido de azufre.	87
Figura B.1. Válvulas no mecánicas.	108
Figura B.2. Válvulas "seal pot" y "loop seal".	108

INTRODUCCIÓN.

Una gran parte de la energía eléctrica que se genera en el país proviene de la combustión de combustóleo; combustible que en los últimos años ha incrementado su concentración de azufre y metales pesados, ocasionando que los generadores de vapor tengan problemas de corrosión, mantenimiento y altas emisiones de contaminantes (óxidos de azufre y nitrógeno principalmente).

En la actualidad los requerimientos de energía eléctrica tienden a incrementarse, así como la necesidad de proteger y preservar el ambiente, ambos factores han contribuido al estudio de nuevas tecnologías capaces de conciliar el binomio desarrollo-ambiente.

Las calderas de lecho fluidizado se han constituido como una opción factible que satisface las necesidades de generación de vapor, así como la protección al ambiente. Son varios los países que emplean esta tecnología para la generación de electricidad, siendo el combustible más empleado el carbón; dentro de los países con mayor experiencia en la tecnología de lechos fluidizados se encuentra China, que cuenta con aproximadamente 2,000 combustores de lecho fluidizado burbujeante.

Para el caso particular de México, con combustibles en su mayoría derivados del petróleo, resulta necesaria la realización de ensayos experimentales que permitan determinar la factibilidad de aplicar esta tecnología a los combustibles nacionales, es por ello que desde 1990 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (I.I.E.) ha realizado pruebas de combustión empleando esta tecnología, en un combustor de lecho fluidizado burbujeante.

Continuando con la línea de investigación, se desarrolló un combustor de lecho fluidizado circulante, primero en su tipo en Latinoamérica y con una capacidad de hasta 0.5 MW térmicos.

Una de las características más importantes de los combustores de lecho fluidizado, además de las bajas emisiones de contaminantes, es la flexibilidad en el uso de combustibles, de tal manera que puede quemar incluso basura; esto representa una gran oportunidad para aprovechar los tiraderos de basura como combustible y generar energía eléctrica sin dañar el ambiente, además de acuerdo con la literatura la ceniza producida por el combustor se puede emplear en la agricultura y la construcción.

El presente trabajo se realizó operando el combustor de lecho fluidizado circulante desarrollado en el I.I.E., con el objetivo de determinar los siguientes aspectos:

- ♦ La operación adecuada de los equipos que componen al combustor.
- ♦ La factibilidad de quemar combustóleo en forma estable y autosostenida.
- ♦ La influencia que tiene la adición de carbonato de calcio al lecho, sobre las emisiones de bióxido de azufre.

Capítulo 1.

FENÓMENO DE FLUIDIZACIÓN.

1.1. Antecedentes teóricos.

La investigación sobre lechos fluidizados se inició en 1921, cuando Fritz Winkler realizó estudios acerca del proceso de gasificación del carbón. El experimento consistía en introducir gases de combustión por el fondo de un recipiente que contenía partículas de coque. En este experimento Winkler observó que las partículas flotaban debido a la corriente ascendente de gases, y que la masa de partículas semejaba un líquido en ebullición; a este proceso se le llamó fluidización.

El fenómeno de fluidización consiste en hacer pasar a través de un lecho de partículas, un fluido en forma ascendente; en un principio pasará prácticamente sin perturbar el lecho pero conforme se incrementa su flujo, se llegará a un punto tal que la velocidad del fluido originará una fuerza de arrastre igual a la fuerza de gravedad ejercida sobre las partículas del lecho; a esta velocidad se le denomina velocidad mínima de fluidización (v_{mf}). Es en este punto donde la caída de presión del fluido a través del lecho (ΔP_{mf}) iguala al peso de las partículas por unidad de área, como se muestra en la figura 1.1.

Incrementos posteriores en la velocidad del fluido ocasionan que el lecho se expanda y que la porosidad (ϵ) aumente. La porosidad se define como:

$$\epsilon = \frac{\text{Volumen del lecho} - \text{Volumen de las partículas}}{\text{Volumen del lecho}}$$

De lo anterior es posible definir a la fluidización como la operación a través de la cual partículas sólidas pueden comportarse como un fluido por medio del contacto con un gas o un líquido. El caso más común, que será objeto del presente trabajo, es el gas-sólido.

La caída de presión a través de un lecho fijo, por unidad de longitud está expresada por la siguiente ecuación (Ergun, 1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu_g v}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho_g v^2}{\phi d_p} \quad (1.1)$$

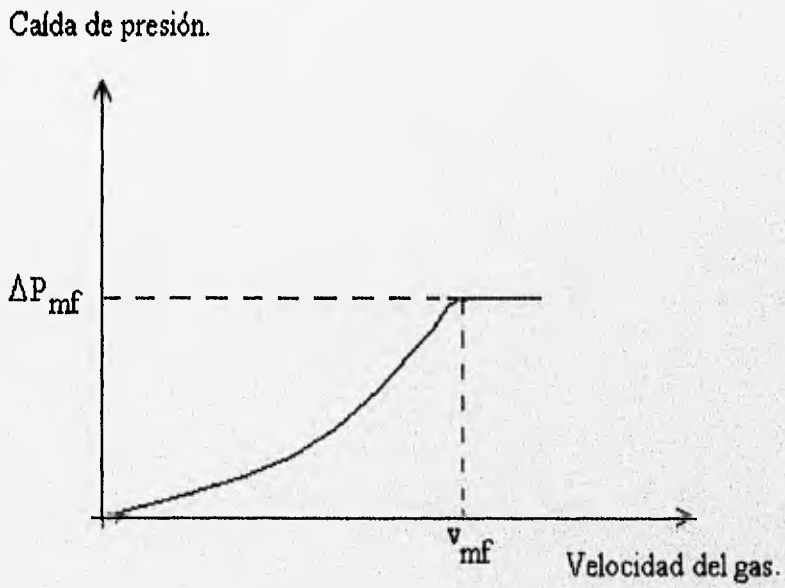


Figura 1.1. Caída de presión vs velocidad del gas.

Donde ϵ es la porosidad del lecho, v , ρ_g y μ_g son la velocidad, densidad y viscosidad del gas respectivamente, d_p es el diámetro promedio de las partículas y ϕ su esfericidad.

La esfericidad describe qué tan cercana se encuentra la partícula de tener una forma esférica; de esta manera una partícula esférica tendrá una esfericidad de 1.

La esfericidad se define entonces como:

$$\phi = \frac{\text{Área de una esfera que tenga el mismo volumen de la partícula.}}{\text{Área de la partícula.}}$$

Para un lecho fluidizado, la caída de presión por unidad de longitud está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P_f}{L} = (\rho_p - \rho_g) (1 - \epsilon) g \quad (1.2)$$

En el punto donde la caída de presión del gas iguala al peso del lecho por unidad de área, v_{mf} , la ecuación (1.1) así como la (1.2) son válidas, a temperatura constante, por lo que si se igualan ambas ecuaciones se obtiene una expresión que permite calcular la velocidad mínima de fluidización; dicha ecuación es:

$$v_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \left[(C_1^2 + C_2 Ar)^{0.5} - C_1 \right] \quad (1.3)$$

donde Ar es conocido como el número de Arquímedes o de Galileo.

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2}$$

Al igualar las expresiones (1.1) y (1.2) en el punto de mínima fluidización, se llega a una ecuación con dos incógnitas (ϵ_{mf} y v_{mf}) que son dependientes entre sí. Para encontrar el valor de la velocidad mínima de fluidización se incluye la porosidad en las constantes C_1 y C_2 , de tal manera que a partir de datos experimentales se puede determinar el valor de dichas constantes y así calcular la velocidad mínima de fluidización; cabe destacar que los valores encontrados para dichas constantes son válidos dentro de ciertos límites, fijados principalmente por el tipo de partícula con que se experimentó. En este sentido se tiene que los valores de C_1 y C_2 (para partículas mayores de 100 μ m de diámetro), según Geldart y Abrahamsen (1981), son 33.7 y 0.0408 respectivamente.

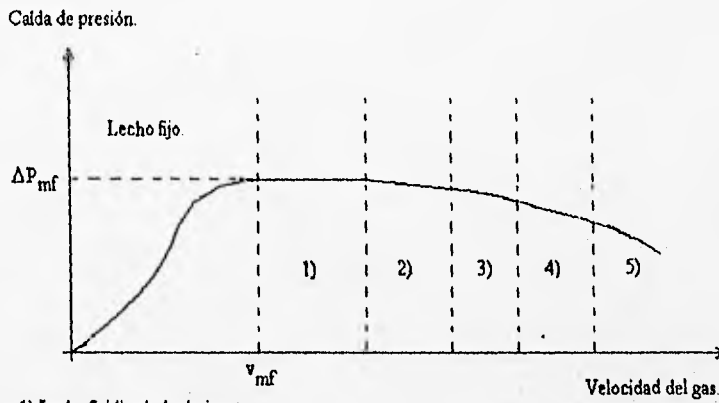
1.2. Tipos de fluidización.

El comportamiento del lecho es diferente según se emplee un gas o un líquido para fluidizar; para el caso del líquido una vez superada la velocidad mínima de fluidización (v_{mf}), la expansión del lecho y el espacio entre partículas aumentan uniformemente con el incremento de la velocidad del líquido, mientras que para el caso del gas el lecho pierde rápidamente su expansión uniforme, de tal manera que al incrementarse la velocidad del gas el sistema presenta huecos que contienen algunos sólidos. Los diferentes estados por los que pasa el lecho, en función de la velocidad del gas se muestran en la figura 1.2 y son:

- a) Lecho fijo: en este punto el flujo de gas pasa a través de los intersticios del lecho, pero su velocidad no es la suficiente para alterar la estabilidad de las partículas.
 - a.1) Lecho expandido: el flujo de gas es capaz de alterar la estabilidad de las partículas, provocando que el lecho se expanda.
 - a.2) Lecho incipientemente fluidizado: con un pequeño incremento en la velocidad de fluidización, las partículas del lecho se mantienen suspendidas, es decir la caída de presión del gas iguala al peso de las partículas por unidad de área.
- b) Lecho fluidizado burbujeante: en este punto el gas fluye a través del lecho en forma de burbujas, su comportamiento asemeja un líquido en ebullición.

Las burbujas son huecos de gas con muy pocos sólidos en su interior. Debajo de ellas existe una estela que se forma cuando el flujo de partículas alrededor de la burbuja llega a la parte inferior produciéndose un choque entre las partículas encontradas, lo que ocasiona que parte de ellas sean lanzadas hacia el interior de la burbuja, y posteriormente se incorporan de nuevo a la estela, de forma tal que se tiene una agitación constante del material ahí depositado (figura 1.3).

Al llegar la burbuja a la superficie hace erupción, impulsando las partículas que arrastró en su camino; dependiendo de su tamaño, las partículas retornan al lecho o son arrastradas a la región de finos. Este hecho da lugar a que se defina la altura de desacoplamiento de partículas (A.D.P.), es decir las partículas que rebasen esta altura serán arrastradas, mientras que las partículas que no lleguen a dicha altura regresarán al lecho, como se muestra en la figura 1.4.



- 1) Lecho fluidizado burbujeante.
- 2) Lecho fluidizado intermitente.
- 3) Lecho fluidizado turbulento.
- 4) Lecho fluidizado circulante.
- 5) Transporte neumático.

Figura 1.2. Tipos de fluidización.

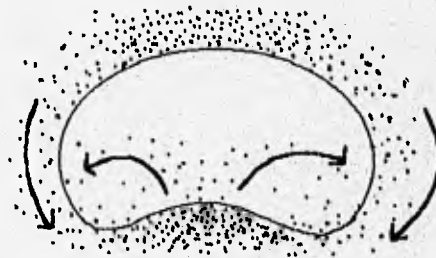


Figura 1.3. Estela de la burbuja.

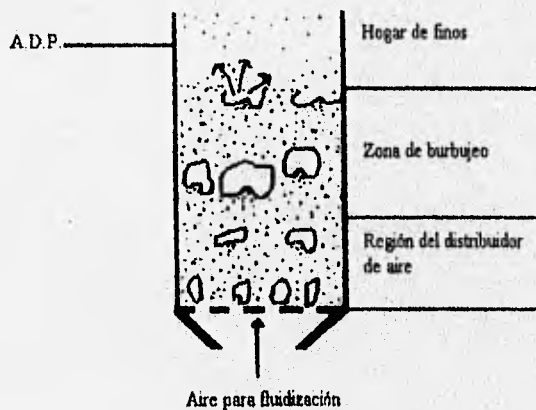


Figura 1.4. Zonas de un lecho fluidizado.

La velocidad promedio de las burbujas, en un lecho burbujeante, puede ser calculada a través de la siguiente correlación semiempírica desarrollada por Davidson y Harrison (1963).

$$v_B = k (v - v_{mf}) + v_1 \quad (1.4)$$

Donde $k \cong 1$ (para la región burbujeante cercana al distribuidor de aire, también es función de la porosidad del lecho) y v_1 es la velocidad de una burbuja.

La velocidad de una burbuja puede obtenerse de la siguiente ecuación (Davidson y Harrison, 1963).

$$v_1 = 0.71 \sqrt{g D_B} \quad (1.5)$$

Donde D_B es el diámetro de la burbuja.

c) Lecho fluidizado intermitente: este tipo de fluidización se caracteriza por el incremento en el tamaño de las burbujas, que pueden abarcar prácticamente la totalidad del área del lecho (figura 1.5).

Se presenta generalmente cuando la superficie del lecho es pequeña y el lecho es profundo. La velocidad de las burbujas puede calcularse por medio de la siguiente fórmula, (Stewart y Davidson, 1967).

$$v_{st} = v_{mf} + 0.07 (g D)^{0.5} \quad (1.6)$$

Donde D es el diámetro del lecho.

d) Lecho fluidizado turbulento: en este tipo de fluidización el lecho se encuentra bastante expandido y existe una alta actividad en el mezclado; además de no distinguirse la formación de burbujas, como se muestra en la figura 1.6.

En los tipos de fluidización hasta ahora mencionados, los sólidos permanecen dentro de cierta altura, es decir no existe una cantidad considerable de partículas arrastradas, por ello se les denomina como "cautivos".

e) Lecho fluidizado circulante: en este tipo de fluidización se observan delgados conglomerados de partículas en movimientos ascendentes y descendentes, en una dispersión de sólidos muy diluida (figura 1.7).



Figura 1.5. Lecho fluidizado intermitente.



Figura 1.6. Lecho fluidizado turbulento.

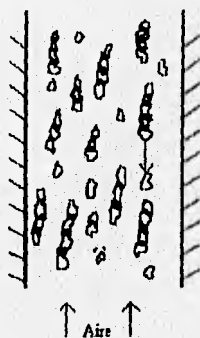


Figura 1.7. Lecho fluidizado circulante.

Bajo este patrón de fluidización se obtiene un excelente mezclado gracias a la formación y desintegración de los conglomerados de partículas.

La formación de dichos conglomerados se debe a la presencia de una cantidad adecuada de sólidos tal que les permite entrar en la estela de otros y de esta manera ir aumentando su tamaño.

La desintegración de conglomerados ocurre debido a que cuando están unidos su peso combinado es mayor que la fuerza de arrastre del gas, por ello se separan y posteriormente se unen a otro conglomerado de partículas.

1.3. Aplicaciones.

Las principales consideraciones que se tienen para usar un lecho fluidizado son:

- La gran área de contacto por unidad de masa de sólido que ofrecen.
- La cantidad de material posible de manejar.
- El alto grado de mezclado.
- Sus altos coeficientes de transferencia de calor.
- Su homogeneidad en la temperatura del lecho.

De esta manera se encuentra aplicación de los lechos fluidizados en procesos tales como: el mezclado de polvos finos; en procesos que requieran el intercambio de calor; en reacciones catalíticas; en calderas, etc.

Procesos más específicos donde se emplean los lechos fluidizados son: el secado de aire por medio de partículas de sílica gel; el cubrimiento de superficies metálicas con materiales plásticos, en este proceso la superficie del metal es calentada y posteriormente se sumerge en el lecho de partículas de plástico que "moja" la superficie uniformemente.

Los lechos fluidizados también son empleados ampliamente en procesos químicos, como es el caso de la desintegración catalítica del petróleo; la corriente de alimentación se contacta con el catalizador a la entrada del reactor, se realizan las reacciones de desintegración y a la salida del reactor el catalizador es separado de los productos por medio de ciclones; el catalizador agotado pasa al regenerador donde se inyecta aire para quemar el carbón contenido en él y así ser usado de nuevo en el reactor.

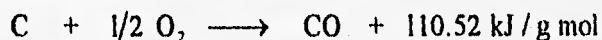
Los lechos fluidizados son empleados también en procesos de combustión; su uso para la generación de vapor en centrales termoeléctricas constituye una gran alternativa desde el punto de vista ecológico por sus bajas emisiones de contaminantes y flexibilidad en el empleo de combustibles.

Capítulo 2.

COMBUSTIÓN.

2.1. Proceso químico.

Desde un punto de vista industrial, la combustión es un fenómeno en el cual el oxígeno reacciona rápidamente con elementos característicos de los combustibles (carbón, hidrógeno y azufre), dando como productos sus óxidos y un gran desprendimiento de energía en forma de calor y luz. Las principales reacciones químicas ocurridas durante la combustión son las siguientes:



2.1.1. Tipos de combustión.

Conociendo la composición del combustible y la del aire es posible determinar la cantidad de oxígeno que se requiere para la combustión por medio de cálculos estequiométricos, así como la cantidad de aire y la relación másica aire/combustible. Dependiendo de la relación aire/combustible se puede tener:

- a) Una combustión subestequiométrica: en ella la cantidad de oxígeno presente es inferior a la requerida, de acuerdo con la estequiometría, por lo tanto la combustión es parcial.
- b) Una combustión estequiométrica: el oxígeno utilizado corresponde a la cantidad estequiométrica de oxígeno necesaria para que en los productos de la reacción no existan remanentes de combustible ni de oxígeno, es decir que los reactivos sean consumidos totalmente.
- c) Una combustión con exceso de aire: en ella la cantidad de oxígeno alimentado es mayor a la requerida estequiométricamente; esto se debe a que en los procesos de combustión reales no se puede conseguir un contacto perfecto entre las moléculas del oxígeno y las partículas del combustible, por lo que es necesario aumentar la cantidad de oxígeno para tener una combustión completa.

De los tipos de combustión mencionados el que se emplea con mayor frecuencia, en la industria, es la combustión con exceso de aire.

2.1.2. Clasificación de las flamas.

Una de las características más comunes de la combustión es la presencia de flamas; se puede definir a la flama como la manifestación visible de la reacción de combustión.

La flama tiene como principal característica la autopropagación a través del medio en el que se encuentra (si éste es adecuado).

De acuerdo a la velocidad con que se propague la flama, el fenómeno que ocurra puede ser una detonación, donde la velocidad de propagación alcanza velocidades supersónicas o una deflagración (combustión normal), donde las flamas se propagan a velocidades inferiores a la del sonido.

Es posible clasificar a las flamas bajo dos criterios:

1) Homogeneidad de la mezcla aire-combustible.

Dentro de este criterio se tienen las flamas de premezcla y las flamas de difusión; las flamas de premezcla son aquellas en las que el combustible y el aire se mezclan homogéneamente antes de la combustión; en este tipo de flama el proceso está controlado por la velocidad de la reacción de combustión; se presentan únicamente en combustibles gaseosos o bien que estén vaporizados antes de alcanzar el frente de flama, (figura 2.1).

En las flamas de difusión el combustible y el oxígeno alcanzan el frente de flama por separado y forman una mezcla heterogénea; este tipo de flamas ocurren cuando se queman combustibles líquidos o sólidos, su principal característica es que la velocidad de combustión no es función de la rapidez de la reacción sino de la velocidad de difusión interfacial entre el combustible y el oxígeno del aire; como la difusión interfacial depende del área de contacto entre el combustible y el oxígeno, se hace necesario atomizar o pulverizar el combustible (dividirlo en pequeñas gotas o partículas, según sea el caso), con lo que se consigue aumentar su área superficial y mejorar el proceso de combustión.

Las gotas o partículas del combustible tienen distintos tamaños y su movimiento es en diversas direcciones, de modo que las zonas de combustión no son del todo claras, a diferencia de las flamas de premezcla que al tener una mezcla homogénea presentan zonas de combustión bien definidas.

Para el caso de combustibles líquidos (como el combustóleo), las flamas de difusión están constituidas por tres zonas: la primera es la zona de vaporización, en donde las gotas comienzan a perder tamaño y a evaporarse; en la siguiente zona, llamada de ignición, los vapores del combustible que rodean a la gota entran en combustión y se forman los productos de la misma; por último la gota pasa a la zona de flama, donde completa su combustión. Estas zonas se encuentran ilustradas en la figura 2.2.

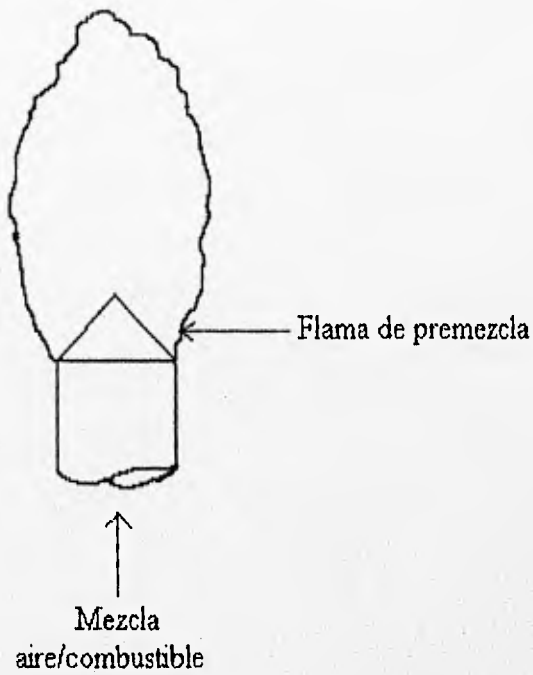


Figura 2.1. Flama de premezcla.

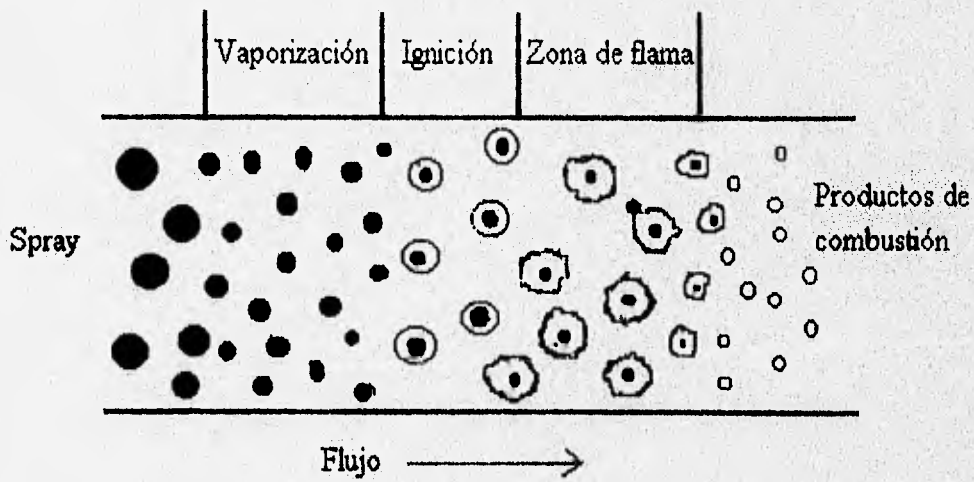


Figura 2.2. Zonas de las flamas de difusión.

2) Por su régimen de flujo.

Bajo esta clasificación se tienen dos tipos de flamas, las flamas laminares y las turbulentas. En las flamas laminares la propagación de la flama ocurre en una zona bien definida y no presenta picos.

En las flamas turbulentas la zona de propagación es muy irregular, la relación aire/combustible es alta y normalmente van acompañadas de ruido, el ejemplo más ilustrativo es la flama de un soplete.

2.1.3. Modelos de combustión.

Desde un punto de vista microscópico, los modelos más comunes que describen el proceso de combustión de una gota aislada son: el modelo de combustión envolvente y el modelo de combustión de estela.

2.1.3.1. Modelo de combustión envolvente.

Es el más simplificado y tiene las siguientes suposiciones:

- No existe movimiento de la gota.
- La gota se encuentra aislada, es decir no hay interacción con otras gotas.
- Al consumirse la gota no queda residuo sólido (combustible totalmente volátil).
- La flama envuelve a la gota.
- La temperatura es homogénea.

Como ya se mencionó anteriormente, la gota se encuentra aislada e inmóvil; al absorber calor del medio, se desprende de su superficie vapor de combustible que difunde hacia el exterior; el oxígeno que rodea a la gota difunde en sentido opuesto, es decir acercándose a la gota. La difusión de ambos gases alcanza un punto en donde la concentración de oxígeno y vapor de combustible forma una mezcla inflamable y se produce la combustión alrededor de la gota, figura 2.3.

En la misma figura se ilustran los perfiles de temperatura y concentración como función del radio de la gota (r_G) y el radio de la flama (r_F).

Bajo este modelo se observa que el tiempo de quemado de la gota es función del diámetro de la misma.

Cabe resaltar que este modelo de combustión se ajusta mejor en flamas de difusión de combustibles líquidos volátiles cuya atomización no produzca gotas con diámetros mayores a los 20 μ m.

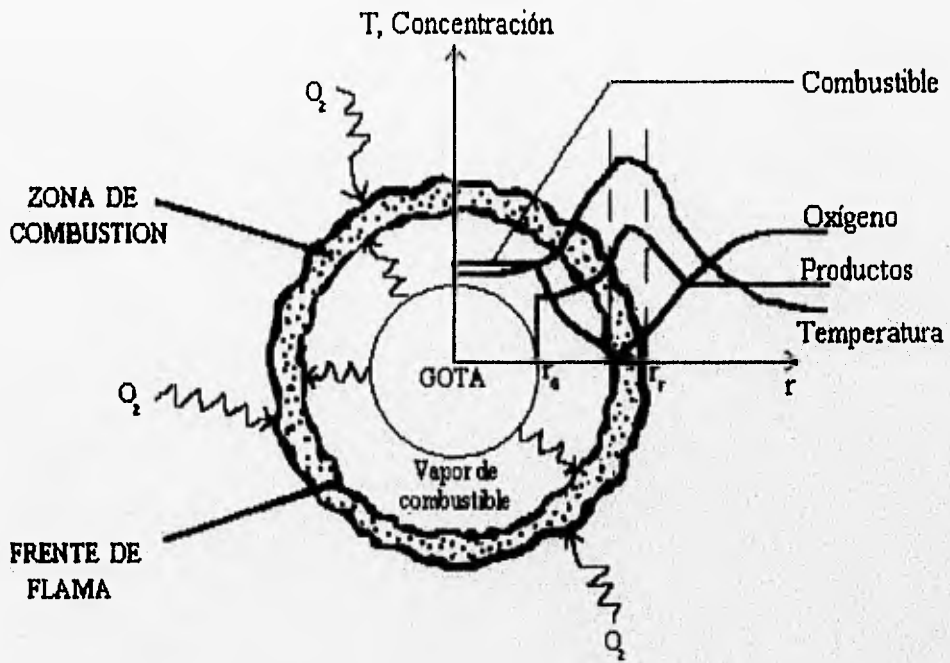


Figura 2.3. Esquema del modelo de combustión envolvente.

2.1.3.2. Modelo de combustión de estela o heterogénea.

Parte de las siguientes suposiciones:

- La gota presenta movimiento.
- La temperatura no es homogénea.
- Existe residuo carbonoso.

La combustión en este modelo se encuentra controlada por la convección forzada sobre la gota; que se desplaza a una velocidad superior a la de los gases de combustión. La velocidad a la que ocurre la combustión de estela se denomina velocidad de extinción, que es la velocidad relativa entre la gota y el aire a la cual la flama que envuelve a la gota se extingue.

En el proceso de combustión de estela, la gota absorbe calor de los alrededores (gases de combustión) por convección forzada y genera vapor de combustible, este vapor fluye hacia la estela de la gota y posteriormente hacia una zona donde se mezclan el oxígeno y el vapor de combustible; cuando dicha mezcla y la temperatura en la estela son apropiadas, ocurre la ignición, como se muestra en la figura 2.4.

El calor generado durante la ignición se transfiere a la estela de otra gota y muy poco de éste es transferido a la gota que lo originó, por ello es muy difícil mantener la ignición en una gota grande, si se mueve a una zona donde la temperatura de los gases es inferior a la temperatura de ignición del combustible usado.

La combustión del residuo carbonoso se ilustra en la figura 2.5.

Este modelo se ajusta mejor a gotas grandes de combustible (mayores de $50 \mu m$), así como a combustibles que poseen fracciones no volátiles como es el caso del combustóleo.

2.2. Proceso físico.

La combustión de los diversos combustibles se logra por medio de equipos denominados quemadores, mediante los cuales se consiguen mezclas aire-combustible apropiadas para la combustión.

2.2.1. Quemadores.

Los quemadores son ductos concéntricos; en el ducto interior se transporta el combustible y en el exterior, de mayor diámetro, se transporta el aire, como se muestra en la figura 2.6.

A la salida del quemador el combustible y el aire se mezclan formando una mezcla inflamable.

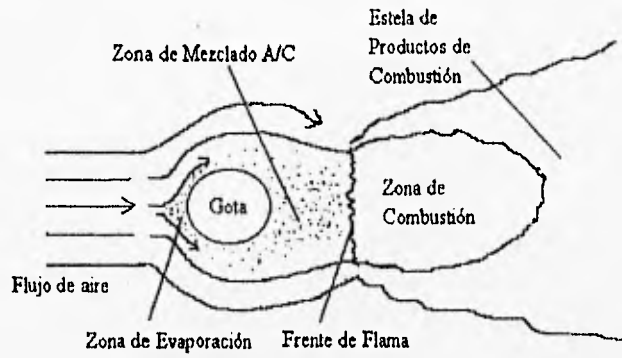


Figura 2.4. Combustión de estela.

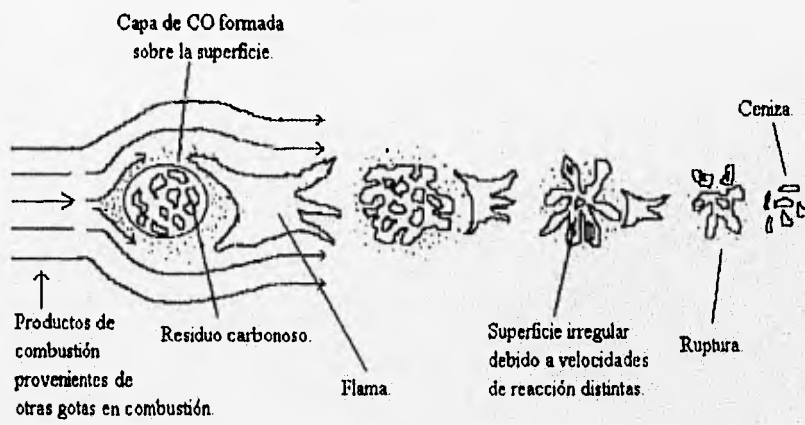


Figura 2.5. Combustión del residuo carbonoso.

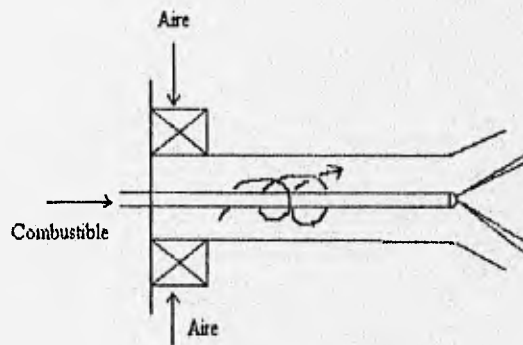


Figura 2.6. Quemador.

2.2.2. Atomizadores.

Para lograr un mejor contacto entre las moléculas de oxígeno y el combustible (líquido) es necesaria la atomización de este último, para ello se emplean equipos llamados atomizadores.

Los atomizadores dividen al combustible en pequeñas gotas, proporcionándoles la velocidad y trayectoria adecuadas para un buen mezclado con el oxígeno, como se muestra en la figura 2.7. El tamaño y la uniformidad de las gotas que se obtienen en un atomizador, definen la calidad de atomización, entre más pequeñas sean las gotas la calidad de atomización será mejor.

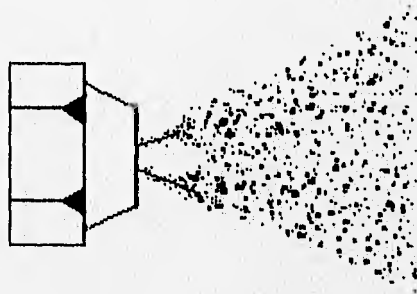


Figura 2.7. Atomizador.

2.3. Combustibles.

Los combustibles son sustancias con un alto contenido de carbón e hidrógeno, capaces de presentar el fenómeno de combustión, es decir, reaccionar con el oxígeno liberando una gran cantidad de energía térmica.

En la industria los combustibles más ampliamente usados, por calderas pequeñas, son el gas natural, el diesel, el gas L. P. y el combustóleo.

El uso de carbón sólo se justifica en calderas grandes, como las empleadas en centrales termoeléctricas para la generación de electricidad, debido a que es más económico que quemar algún combustible derivado del petróleo.

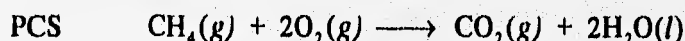
2.3.1. Características de los combustibles.

Las principales características de un combustible, además de su alto contenido en carbón e hidrógeno (composición química), son el poder calorífico, la viscosidad, la temperatura de inflamación, la temperatura de escurrimiento, el contenido de azufre, el contenido de cenizas y el contenido de humedad. Para el caso de los combustibles gaseosos es importante conocer los límites de inflamabilidad y la velocidad de propagación de la flama.

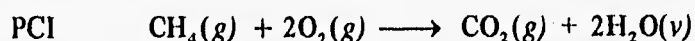
- 1) Composición química: indica la cantidad presente de cada compuesto (o elemento) que constituye al combustible, de lo anterior se observa que existen dos formas de expresar la composición química, una es mencionando el porcentaje de cada sustancia en el combustible (por ejemplo, el gas natural está constituido por 92.3% de metano, 6.3% de etano y 1.4% de propano) y la otra forma es mencionando la cantidad presente de cada elemento (por ejemplo, el gas natural contiene 75.4% de carbón y 24.6% de hidrógeno).
- 2) Poder calorífico: es el calor liberado por unidad de masa de combustible; en base al estado de agregación del agua, producida por la combustión del hidrógeno del combustible, se puede tener el poder calorífico superior o el inferior.

En el poder calorífico superior (PCS), se asume que la reacción de combustión produce agua en estado líquido; dicha suposición surge debido a que al realizarse la medición del poder calorífico del combustible, en una bomba calorimétrica, el vapor de agua producido se condensa y cede su calor al medio que lo rodea.

Para el caso del poder calorífico inferior (PCI) o neto, la reacción de combustión produce agua en estado vapor. Suponiendo la combustión de metano se tiene lo siguiente:



Y para el poder calorífico inferior o neto:



En el caso del poder calorífico inferior, al realizarse la combustión, el agua producida no se condensa permaneciendo en su estado vapor, por ello su valor es menor que el del poder calorífico superior (la diferencia entre el PCS y el PCI es precisamente el calor latente de vaporización del agua).

3) Viscosidad: es una de las propiedades físicas más importantes de los combustibles líquidos, pues de ella depende en gran parte que la combustión sea eficiente, ya que es el factor que más influye en el tamaño de las gotas que producen los atomizadores.

La viscosidad es la medida de la resistencia que presentan los fluidos al movimiento, su principal característica es la dependencia que presenta con respecto a la temperatura.

4) Temperatura de inflamación: se define como la temperatura a la que el combustible desprende una cantidad de vapores tal que al mezclarse con el aire forman una mezcla inflamable.

5) Temperatura de escurrimiento: es la temperatura a la cual el combustible comienza a fluir.

6) Contenido de azufre: el azufre es uno de los componentes más problemáticos de los combustibles, pues a pesar de que contribuye significativamente en la energía térmica liberada, sus óxidos son de los contaminantes atmosféricos más dañinos, además de que al transformarse en ácido sulfúrico corroen las partes de la caldera.

7) Contenido de cenizas: los combustibles residuales, como es el caso del combustóleo, tienen ciertos metales (vanadio, sodio y níquel principalmente), que al ser oxidados forman cenizas que ensucian y/o corroen los tubos en las calderas, además de disminuir los coeficientes de transferencia de calor.

8) Contenido de humedad: los combustibles residuales contienen cierta cantidad de agua; entre el 1 y 2% no ocasiona problemas, pero cantidades mayores pueden provocar que el quemador se apague.

En cuanto a los combustibles gaseosos, las características que se necesitan conocer son:

1) Límites de inflamabilidad: para lograr la combustión de un combustible gaseoso (o líquido) es necesario que la mezcla oxígeno-combustible sea la adecuada, para ello se dan ciertos límites de concentración del combustible. Con base en estos límites es posible obtener rangos de concentración de combustible en los cuales es factible su combustión.

Si la concentración de combustible se encuentra por debajo del límite inferior o arriba del límite superior de inflamabilidad, la combustión del mismo no podrá realizarse.

2) Velocidad de propagación de la flama: la propagación de la flama es función principalmente de la cantidad de combustible y del exceso de aire.

La dirección de la velocidad de propagación de la flama es opuesta a la dirección de la velocidad de la mezcla aire-combustible.

2.3.2. Principales combustibles para calderas empleados en México.

En México, los combustibles más usados en las calderas son:

- Gas natural.
 - Diesel.
 - Gasóleo.
 - Combustóleo.
- Gas natural: este combustible es uno de los más apreciados, debido a su facilidad de manejo, las altas eficiencias de combustión que brinda y por la ausencia de cenizas y azufre. La principal desventaja que presenta es su baja disponibilidad, es decir su uso se restringe a las regiones del país que cuentan con él.

Se encuentra constituido principalmente por metano (CH_4), una parte de etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8), además de otros constituyentes.

El gas natural extraído por Petróleos Mexicanos (PEMEX) tiene la siguiente composición:

Compuesto	% en volumen
Metano (CH_4)	92.3
Etano (C_2H_6)	6.3
Propano (C_3H_8)	1.4
Ácido sulfhídrico (H_2S)	17 ppm

- Diesel: es un combustible líquido destilado, se usa bastante en las calderas industriales. En el mercado nacional PEMEX ofrece tres tipos de diesel (diesel # 1, diesel # 2 y diesel especial), la diferencia entre ellos es principalmente el contenido de azufre.
- Gasóleo: es una fracción destilada del petróleo, intermedia entre las kerosinas y el aceite lubricante ligero. Se utiliza como combustible doméstico e industrial y como carga de partida para los procesos de craqueo.
- Combustóleo: el combustóleo es un aceite pesado, obtenido de los residuos de la refinación del petróleo crudo, como se muestra en la figura 2.8.

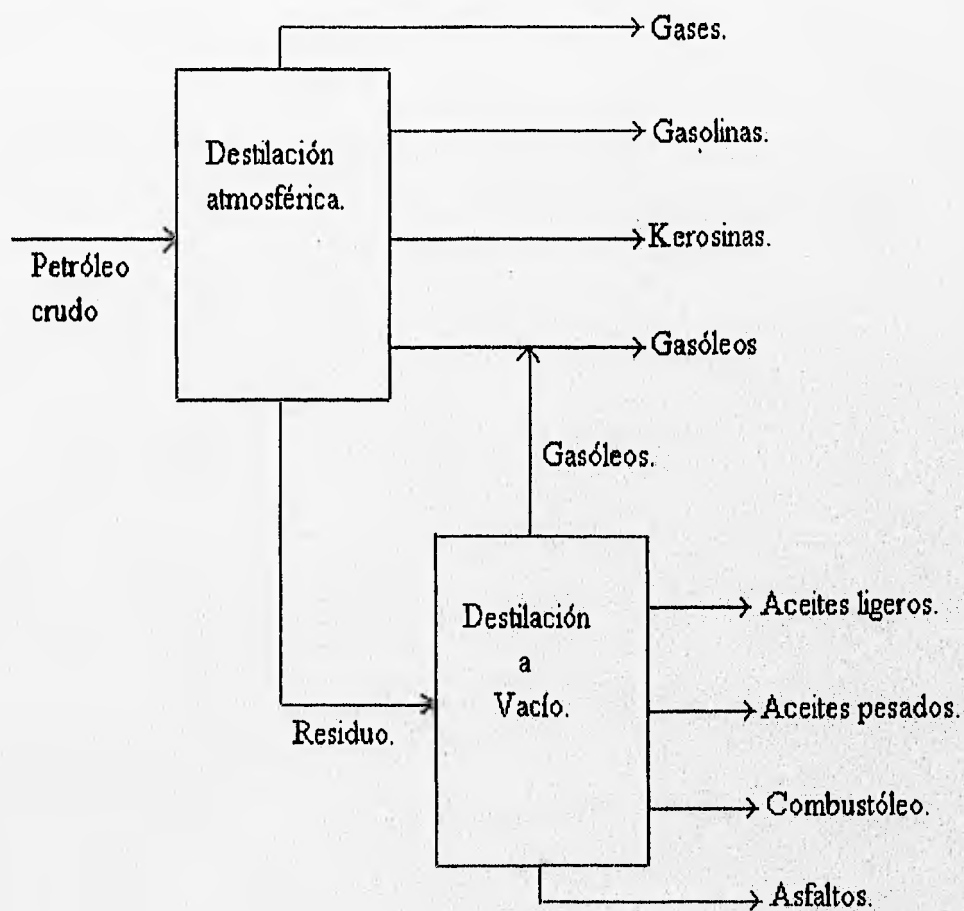


Figura 2.8. Obtención del combustóleo.

En la tabla 2.1. se muestran propiedades básicas de los combustóleos mexicanos, como se puede observar su calidad no es muy alta, debido principalmente a la elevada cantidad de azufre e inorgánicos que contienen. Para Estados Unidos, por ejemplo, el combustible equivalente al combustóleo, fuel oil residual, tiene como máximo 2.8 % de azufre y la cantidad de carbón en el combustible es de 85.70 % en peso.

Tabla 2.1.

Valores estadísticos de las propiedades básicas de los combustóleos mexicanos.

Propiedad.	Promedio.	Mínimo.	Máximo.
Densidad (g/cm ³).	0.983 ± 0.007	0.958	0.999
Tensión superficial (dinas/cm).	29.7 ± 0.4	28.4	30.4
Poder calorífico (kcal/kg).	10,130 ± 190	9,660	11,200
Carbono % peso.	84.9 ± 1.1	81	87.7
Hidrógeno % peso.	10.9 ± 0.7	9.2	12.7
Nitrógeno % peso.	0.41 ± 0.10	0.14	0.58
Azufre % peso.	3.4 ± 0.4	2.3	4.4
Cenizas % peso.	0.05 ± 0.01	0.02	0.11
Vanadio (ppm).	184.0 ± 38.9	81.5	327.8
Níquel (ppm).	13.2 ± 7.6	1.2	43
Sodio (ppm).	30.6 ± 10.2	4.8	57.0

2.4. Contaminación.

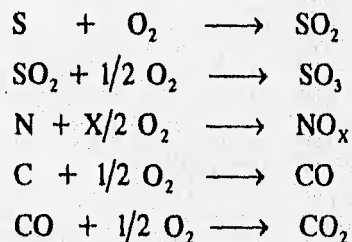
La combustión de combustibles fósiles, en fuentes fijas y medios de transporte, es la principal causa de la contaminación atmosférica; siendo los contaminantes más perjudiciales los óxidos de azufre y nitrógeno.

La cantidad emitida de estos óxidos es función de dos aspectos: la composición química del combustible y las características del sistema de combustión empleado.

2.4.1. Contaminación por fuentes fijas de combustión.

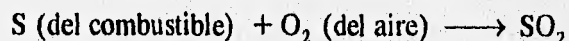
En el caso de las fuentes de combustión fijas (calderas y hornos) los óxidos de azufre y nitrógeno, así como los de carbono constituyen los contaminantes emitidos más importantes.

Las principales reacciones químicas ocurridas durante la combustión, de un combustible fósil son las siguientes:



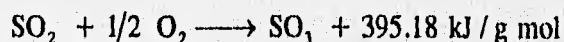
2.4.2. Formación de óxidos de azufre en calderas.

Los óxidos de azufre se producen durante las primeras etapas del proceso de combustión.



Si la cantidad de aire suministrada fuera la estequiométrica la reacción anterior se detendría en esa etapa, pero dado el exceso de aire suministrado esto no ocurre.

La oxidación posterior del bióxido de azufre, en fase gaseosa homogénea, a SO_3 se realiza según la reacción siguiente:



La realización de la reacción anterior depende fuertemente de la temperatura, por lo que se presentan tres posibilidades:

- a) Si la temperatura se encuentra por arriba de los 1093 °C la reacción se encuentra desplazada hacia la izquierda, el SO_3 formado se disocia por el efecto de la temperatura.
- b) Si la temperatura se encuentra entre los 426 °C y 1093 °C coexisten el SO_2 y el SO_3 en proporciones variables.
- c) Si la temperatura se encuentra por debajo de 426 °C, la reacción está desplazada hacia la derecha, convirtiéndose prácticamente todo el SO_2 en SO_3 .

A pesar de que los gases de combustión de las calderas tienen un perfil de temperatura favorable para la formación de SO_3 (entre 176 y 982 °C), sólo el 1 ó 2% del SO_2 se transforma en SO_3 , esto se debe a que el tiempo de residencia de los gases de combustión dentro de la caldera es tan corto (1 a 4 segundos) que la velocidad con que el sistema se desplaza al equilibrio no es la suficiente para dar origen a la reacción.

Estudios realizados sobre la transformación del SO_2 en SO_3 (Harlow, 1944) mostraron que al hacer pasar los gases de combustión sobre trozos de acero oxidado, la concentración del SO_3 se incrementaba.

Burnside, en 1956 reportó los resultados de sus experiencias realizadas en una pequeña caldera, dichos resultados revelaban que al circular los gases de combustión por los tubos del sobrecalentador, la concentración del SO_3 aumentaba, también encontró que el incremento en la temperatura del metal de los tubos era proporcional a la concentración del SO_3 .

Estudios posteriores sobre la acción catalítica de las cenizas y otros óxidos (Wickert, 1957) mostraron que el Fe_2O_3 es el principal catalizador en la transformación del SO_2 en SO_3 , y la gran influencia que tiene la temperatura sobre dicha conversión (figura 2.9).

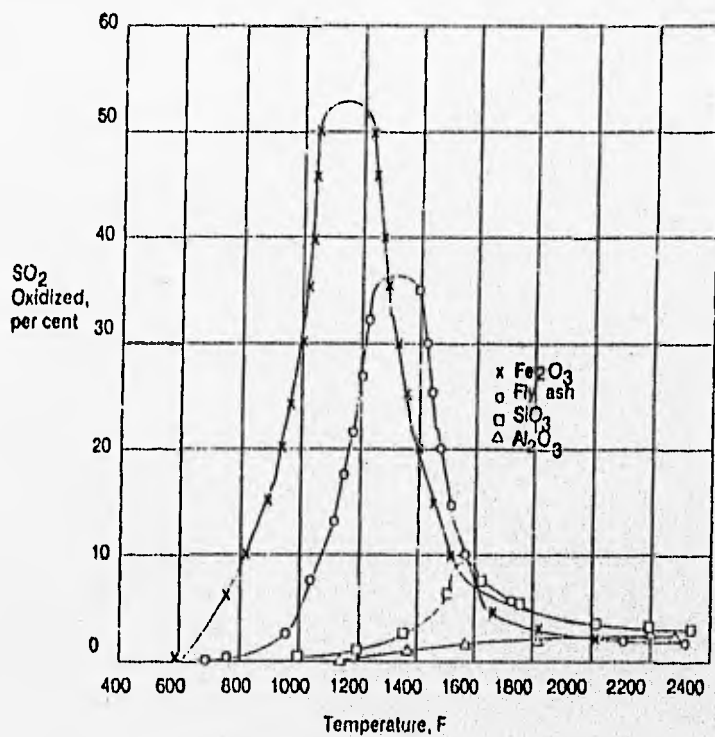
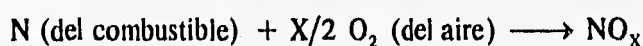


Figura 2.9. Transformación del SO₂ en SO₃ en función de diferentes catalizadores y temperaturas.

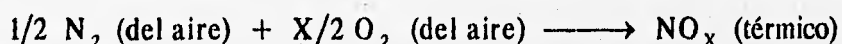
2.4.3. Formación de óxidos de nitrógeno en calderas.

La formación de óxidos de nitrógeno tiene dos orígenes, los cuales son:

1) A partir del nitrógeno contenido en el combustible.



2) A partir del nitrógeno proveniente del aire (NO_x térmico).



La segunda reacción es generalmente quien aporta la mayor cantidad de NO_x formado, dicha reacción se ve favorecida por las altas temperaturas de la flama (a temperaturas inferiores a los 1000 °C la formación de NO_x térmico es despreciable).

2.4.4. Formación de monóxido de carbono en calderas.

El monóxido de carbono tiene su origen principalmente en las combustiones incompletas, donde la cantidad de aire y/o el tiempo no son suficientes para completar su oxidación a CO_2 .

2.4.5. Lluvia ácida.

Los óxidos de azufre y nitrógeno en la atmósfera sufren una serie de reacciones con la humedad, dichas reacciones son catalizadas por la luz del sol y dan lugar a la formación de ácidos, los cuales se precipitan sobre la tierra a través de la lluvia o la nieve, a este hecho se le conoce como lluvia ácida.

Durante las últimas dos décadas la lluvia ha incrementado su acidez, y de un pH de 5.6 ha cambiado a 4.5 e incluso hasta 3.6 (Cogbill and Likens, 1974).

Además de dañar a los seres vivos, la lluvia ácida afecta construcciones, monumentos, pinturas, etc. Con la ayuda del viento, la lluvia ácida puede desplazarse de un lugar a otro ocasionando los problemas ya mencionados.

2.4.6. Problemas originados por la presencia de bióxido de azufre en la biosfera.

La presencia de SO_2 en las plantas ocasiona su decoloración (adquieren un color amarillento), la caída de sus hojas e incluso retrasa su crecimiento.

Los problemas causados por los óxidos de azufre, en el hombre son:

- ♦ Irritación de ojos y piel.
- ♦ Aumento de la frecuencia y gravedad de las enfermedades respiratorias y pulmonares.

2.4.7. Problemas originados por la presencia de óxidos de nitrógeno en la atmósfera y en la biosfera.

El bióxido de nitrógeno (NO_2) en la atmósfera absorbe la radiación ultravioleta proveniente del sol, disociándose en óxido de nitrógeno (NO) y oxígeno atómico, el cual posteriormente se transforma en ozono (O_3); dado que la formación del ozono es función de la luz solar, su concentración cambia constantemente en el transcurso del día.

El NO no constituye un peligro a las concentraciones normales en el aire, pero el NO_2 ocasiona:

- ♦ Tos.
- ♦ Dolor de cabeza.
- ♦ Pérdida del apetito.
- ♦ Corrosión de los dientes.
- ♦ Irritación del aparato respiratorio.

La presencia de ozono a nivel de la biosfera, es potencialmente peligroso, particularmente para las plantas, pues ataca de manera directa a las hojas ocasionando la aparición de puntos más claros en ellas, además detiene su crecimiento.

El ozono afecta en mayor grado a las cosechas de trigo, soja, algodón y árboles tales como el pino y el arce.

Los daños que ocasiona al hombre son:

- ♦ Falta de coordinación de movimientos.
- ♦ Fatiga.
- ♦ Daño al tejido pulmonar (acelera su proceso de envejecimiento y con ello lo hace más susceptible a enfermedades infecciosas).

2.4.8. Problemas originados por la presencia de óxidos de carbono en la atmósfera y en la biosfera.

Los síntomas de las concentraciones altas de CO son:

- ♦ Dolor de cabeza.
- ♦ Mareos.
- ♦ Cansancio.
- ♦ Náusea.
- ♦ Opresión en el pecho.
- ♦ Dificultad para respirar.
- ♦ Debilidad muscular.

Al reaccionar el CO con la sangre desplaza al oxígeno, disminuyendo su cantidad presente en el organismo.

A pesar de que la vida vegetal se beneficia por el aumento de la concentración de CO₂, su presencia en la atmósfera, en altas concentraciones, no es benéfico pues conduce al llamado efecto de invernadero; el CO₂ es un fuerte absorbente de las radiaciones infrarrojas, que además refleja. Por ello al aumentar su concentración en la atmósfera actúa como el vidrio de un invernadero, elevando la temperatura en la capa atmosférica inferior.

Las conclusiones obtenidas de los experimentos realizados sobre la influencia del CO₂ en la temperatura (Manabe y Wetherald, 1967), confirman el efecto de invernadero ocasionado por el CO₂, dichas conclusiones fueron:

- 1) A mayor concentración de CO₂, más alta es la temperatura de equilibrio entre la superficie de la tierra y la troposfera (región inferior de la atmósfera donde ocurren los cambios de clima).
- 2) A mayor concentración de CO₂, menor es la temperatura de la estratosfera.

En contraparte al efecto de invernadero se tiene el efecto de enfriamiento, provocado por la existencia de finas partículas en la atmósfera que impiden el paso de los rayos solares hacia el planeta.

Capítulo 3.

COMBUSTION EN LECHO FLUIDIZADO.

3.1. Proceso químico.

Un combustor de lecho fluidizado es capaz de quemar una amplia variedad de combustibles, que van desde desperdicios municipales (basura peletizada) hasta combustibles cuyas propiedades los hacen ser muy difíciles de quemar en sistemas convencionales, como es el caso de los fondos IMPEX (su bajo punto de fusión ocasiona gran dificultad en su manejo pues al calentarse se aglomera y esto ocasiona la obstrucción de los ductos de alimentación), coque de petróleo, etc.

Desde un punto de vista químico, el proceso de combustión en un lecho fluidizado es el mismo que en los sistemas de combustión convencionales (ocurren las mismas reacciones químicas propias de la combustión).

3.2. Proceso físico.

Las principales características del proceso de combustión, desde un punto de vista físico son:

- El empleo de un "soporte" para realizar la combustión (arena sílica).
- En los combustores de lecho fluidizado no existe flama, en su lugar existen partículas incandescentes con una gran actividad de mezclado.
- Temperaturas de operación inferiores a las manejadas por los sistemas de combustión convencionales.

3.2.1. Variables que influyen en el proceso de combustión en lecho fluidizado.

Los factores que más influyen en el proceso de combustión en un lecho fluidizado son:

- Concentración local de oxígeno: cantidad de aire suficiente para la combustión en distintos puntos del lecho.
- Recirculación de partículas al lecho: disminuye la cantidad de partículas inquemadas, incrementando la eficiencia de combustión; depende de la eficiencia del equipo empleado para la recolección de los finos.

- **Tiempo de residencia de las partículas del combustible:** al aumentar permite una combustión más completa; la recirculación al lecho, su altura, la velocidad de fluidización y el tamaño de las partículas son los parámetros que más influyen sobre esta variable.
- **Temperatura del lecho:** la ignición de la partícula y la retención del SO_2 son función de esta temperatura; cabe destacar que antes de alimentar el combustible al lecho es necesario emplear un combustible auxiliar con el fin de calentar el lecho hasta una temperatura que asegure la ignición del combustible. Una vez que se alcanza dicha temperatura y el combustible es alimentado, el lecho es capaz de realizar la combustión autosostenidamente, es decir, sin la ayuda de un combustible auxiliar.
- **Exceso de aire:** se debe emplear un exceso de aire que permita una combustión eficiente y pocas pérdidas de calor por los gases de chimenea.
- **Velocidad de fluidización, tamaño de las partículas del combustible y del lecho:** el grado que se alcance en la actividad de mezclado, el tiempo de residencia de las partículas del combustible, el régimen de fluidización y los coeficientes de transferencia de calor dependen de estos parámetros.

3.2.2. Temperatura del lecho.

La temperatura del lecho se encuentra en el rango de 700-900 °C y dada la gran actividad en el movimiento de las partículas, es prácticamente uniforme. La elección de la temperatura del lecho se ve influenciada principalmente por:

- a) **La eficiencia de combustión:** a medida que la temperatura del lecho aumenta la constante de la velocidad de reacción se incrementa, ocasionando que una mayor cantidad de combustible sea quemado y con ello se mejore la eficiencia de combustión.
- b) **La retención de azufre:** la selección de la temperatura del lecho influirá de manera directa sobre el comportamiento del aditivo con el SO_2 , de esta manera si el aditivo empleado es piedra caliza, la temperatura óptima para su reacción con el SO_2 es entre 800 y 850 °C (Ehrlich, 1975).
- c) **El punto de fusión de la ceniza:** la temperatura del lecho no debe exceder el punto de fusión de la ceniza, pues cuando la ceniza alcanza dicho punto tiende a formar, junto con las partículas del lecho, aglomerados que afectan la fluidización; la temperatura de fusión del sulfato de calcio es de 1450 °C.

Capítulo 4.

CALDERAS DE LECHO FLUIDIZADO.

4.1. Clasificación.

Las calderas de lecho fluidizado se clasifican bajo dos criterios, la presión y el régimen de fluidización:

1) De acuerdo con la presión manejada en el lecho se tienen:

- Lechos fluidizados atmosféricos.
- Lechos fluidizados presurizados.

2) Con base en el régimen de fluidización empleado:

- Lechos fluidizados burbujeantes.
- Lechos fluidizados circulantes.

Las calderas de lecho fluidizado existentes son combinaciones de ambos criterios; siendo las calderas de lecho fluidizado atmosférico burbujeante los equipos en los que se ha tenido una mayor experiencia.

4.2. Calderas de lecho fluidizado atmosférico burbujeante.

Operan en el régimen de fluidización burbujeante, que pertenece al tipo de fluidización denominado "cautivo", la velocidad del aire de fluidización es del orden de entre 2.5 y 3.5 m/s (dependiendo del tipo de partícula).

La combustión se realiza en el lecho fluidizado; sus paredes están cubiertas con una capa de concreto refractario que disminuye las pérdidas de calor y evita que se erosionen las paredes.

Después de la combustión, los gases ascienden por el lecho arrastrando partículas; al llegar a la altura de desacoplamiento de partículas, una gran parte de ellas regresan al lecho y las restantes siguen ascendiendo hasta llegar al hogar de finos, donde continua el proceso de combustión y el de retención de azufre. Posteriormente pasan por el ciclón, que recircula una parte de los sólidos al lecho y la otra es enviada a los desechos.

La remoción de calor en el lecho se realiza por medio de tubos inmersos en él, dichos tubos además de regular la temperatura son empleados como sobrecalentadores. En la parte superior se encuentran los tubos de convección, que aprovechan el calor de los gases de combustión provenientes del lecho; como se muestra en la figura 4.1.

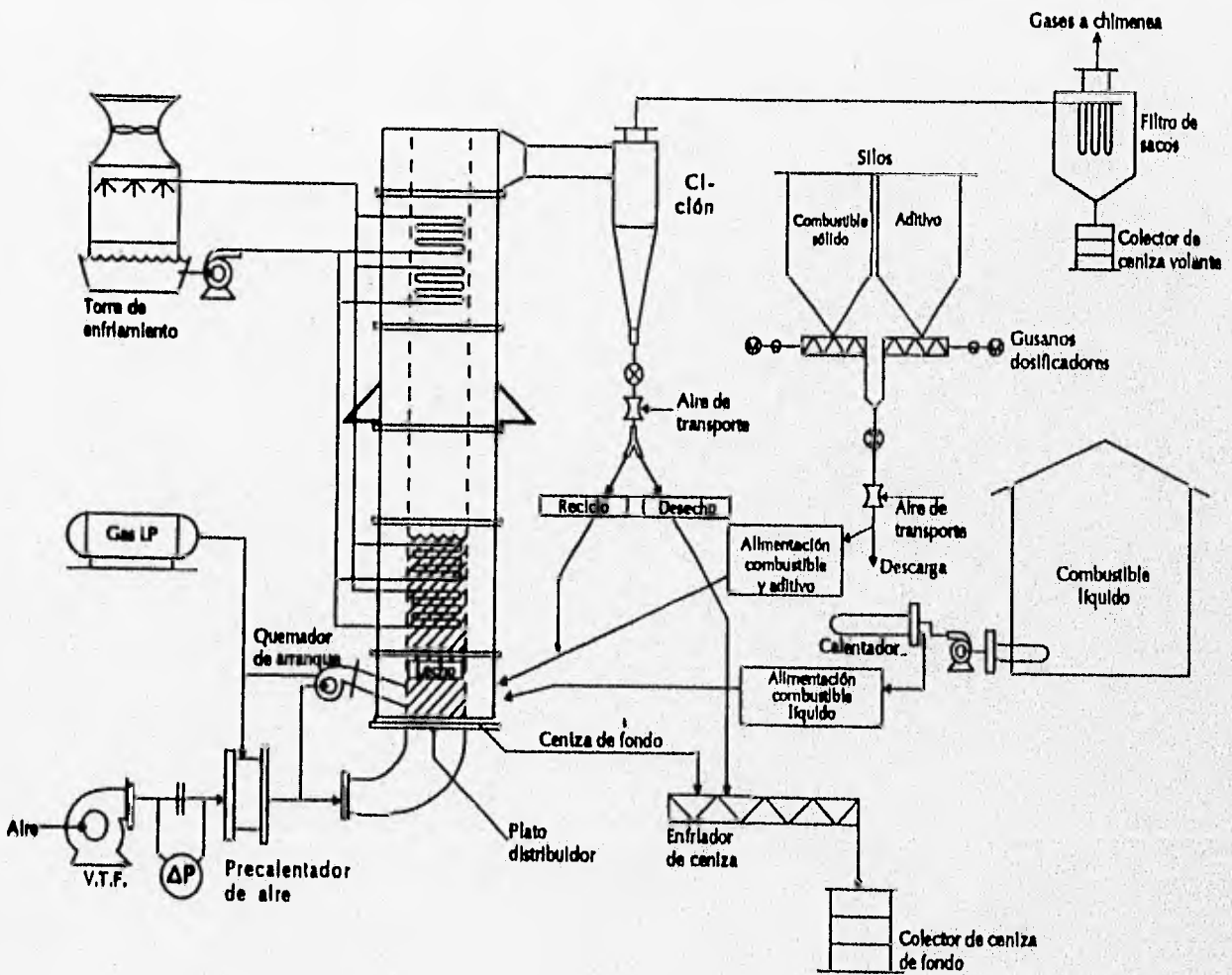


Figura 4.1. Combustor de lecho fluidizado burbujeante.

4.3. Calderas de lecho fluidizado atmosférico circulante.

Diversos experimentos señalan que un aumento en la presión o en la velocidad de fluidización conduce a una mejor combustión y a una mayor generación de vapor por unidad de área del lecho (al incrementarse la velocidad de fluidización también se incrementan los coeficientes de transferencia de calor).

Con base en el incremento de la velocidad de fluidización se diseñaron nuevas calderas denominadas de lecho fluidizado atmosférico circulante, con velocidades de fluidización del orden de 4 a 8 m/s.

La combustión, al igual que en el combustor de lecho fluidizado burbujeante, se realiza en el lecho, sus paredes también están cubiertas con una capa de concreto refractario que evita la erosión y disminuye las pérdidas de calor, pero sólo hasta una cierta altura, por encima de la cual ya no se coloca refractario y las paredes de la caldera son las típicas "paredes de agua", iguales a las de las calderas convencionales.

Una vez realizada la combustión, los gases fluyen hacia la parte superior del lecho; en su camino arrastran una cantidad significativa de partículas (tanto del combustible como del lecho) por lo que se hace necesaria la presencia de un separador gas-sólido (ciclón). Por la parte superior del separador sale la corriente de gases y por la parte inferior los sólidos, que son recirculados al lecho.

La recirculación de las partículas al lecho aumenta su tiempo de residencia y con ello se consigue una combustión más eficiente, así como una mayor retención del azufre del combustible.

En estos equipos se adiciona frecuentemente un cambiador de calor de lecho fluidizado (figura 4.2), que se encuentra entre el lecho y la recirculación de sólidos, dicho cambiador tiene como función, además de la transferencia de calor, controlar las condiciones de operación del combustor cuando se necesita variar la alimentación de combustible.

Este equipo logra controlar la temperatura del lecho, cuando se requiere variar la alimentación de combustible por necesidades del proceso, sin modificar la velocidad de fluidización. La forma en que se consigue dicho control es por medio de la cantidad de sólidos recirculados provenientes del cambiador de calor.

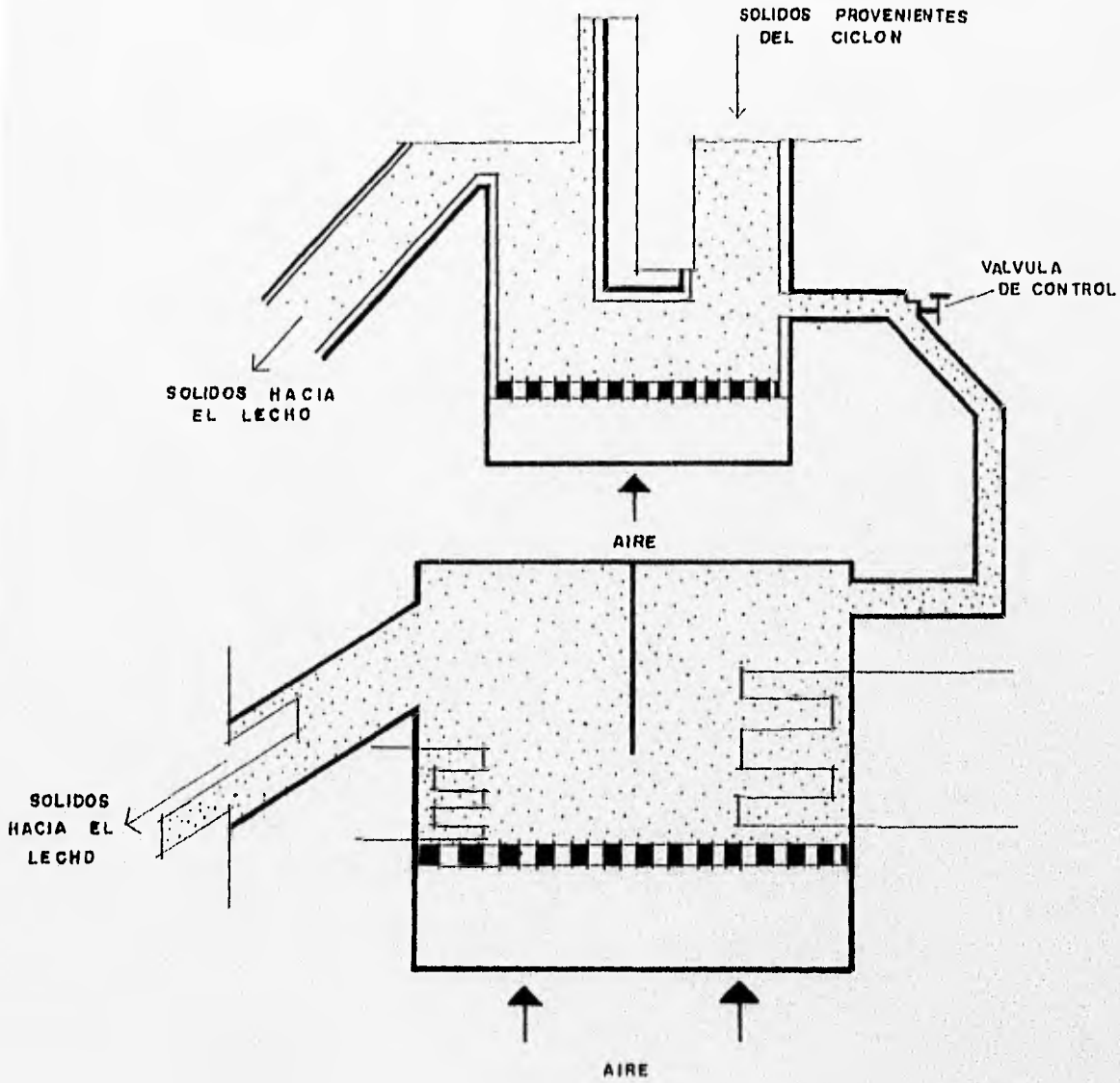


Figura 4.2. Cambiador de calor de lecho fluidizado.

Si el proceso requiere que la alimentación de combustible sufra un decremento, la cantidad de sólidos provenientes del cambiador de calor disminuye (se cierra la válvula de control), con el fin de mantener la temperatura de operación en el lecho; en cambio si se necesita aumentar la alimentación de combustible, la válvula se abre, es decir una mayor cantidad de sólidos pasa al cambiador de calor para controlar la temperatura.

La remoción del calor generado en el lecho se realiza en dos etapas, como se muestra en la figura 4.3.

En la primera etapa, una parte del calor es transferido a los tubos con agua que se encuentran en el lecho y al intercambiador de calor de lecho fluidizado ubicado entre la salida del ciclón y el lecho.

En la otra etapa, se hacen pasar los gases calientes, que provienen del ciclón, a través de los intercambiadores de calor ubicados en la llamada zona convectiva.

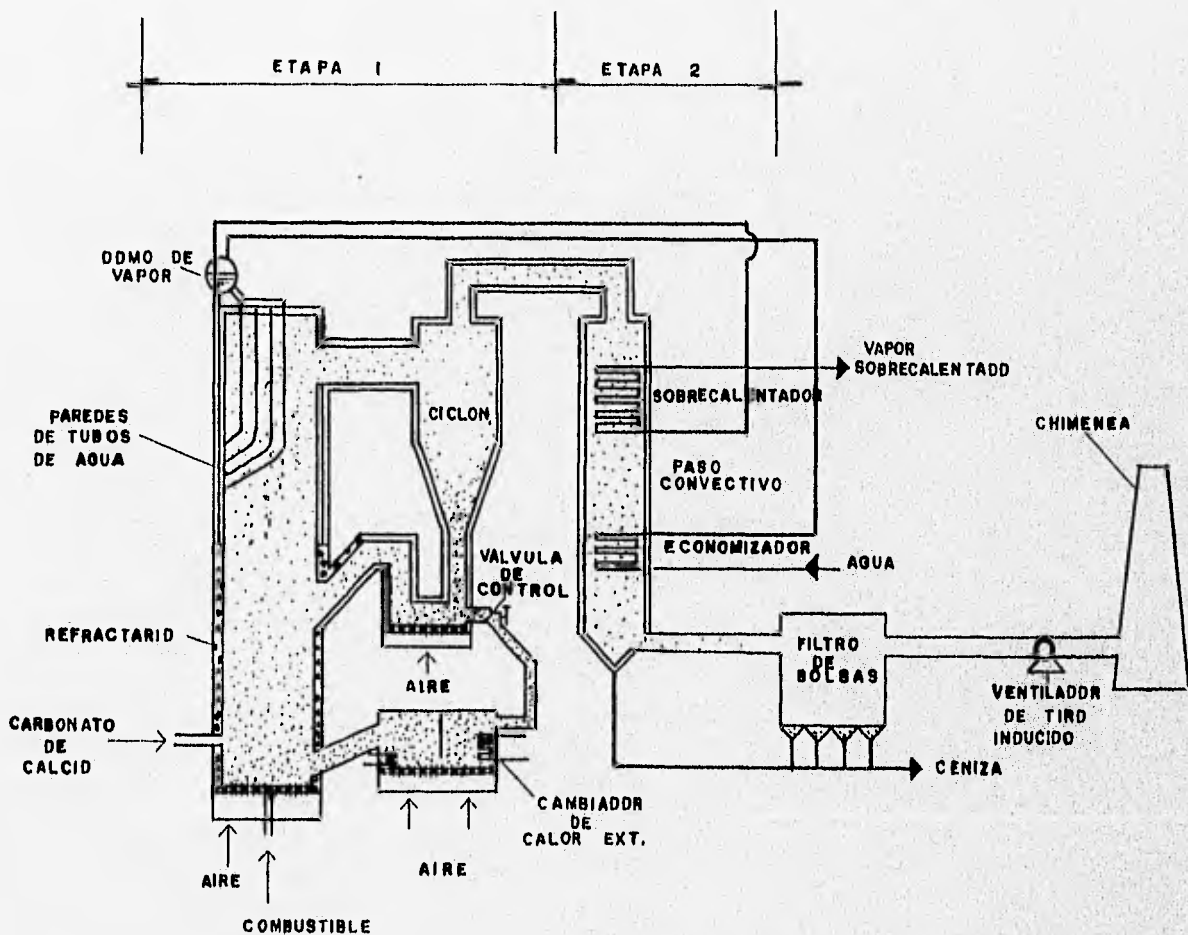


Figura 4.3. Remoción de calor en una caldera de lecho fluidizado atmosférico circulante.

4.4. Calderas de lecho fluidizado presurizado.

Las calderas de lecho fluidizado presurizado (burbujeante o circulante) usualmente operan a presiones mayores a 16 atm; se encuentran todavía en etapa experimental y se espera que tengan un gran auge en los próximos años debido a las altas eficiencias que ofrecen.

Las calderas de lecho fluidizado, y en especial las de lecho presurizado, ofrecen alternativas muy prometedoras para la generación de energía eléctrica por medio de ciclos combinados.

4.5. Comparación entre las calderas de lecho fluidizado burbujeante y circulante.

Las principales puntos de comparación son los siguientes:

- 1) Régimen de fluidización: el régimen de fluidización circulante tiene una actividad de mezclado mucho mayor que la del burbujeante, esto repercute en la eficiencia de combustión, en la homogeneidad de la temperatura del lecho y en el espacio del equipo (los coeficientes de transferencia de calor en el régimen circulante son mayores, por ello ocupan un menor espacio que los equipos que operan en el régimen burbujeante; para una generación de vapor dada).
- 2) Altura del lecho: dado que el régimen de fluidización burbujeante pertenece al tipo de fluidización denominado "cautivo", la altura de su lecho es menor que la del circulante. Esto ocasiona que el tiempo de residencia de las partículas de combustible sea mayor en los combustores de tipo circulante.
- 3) Exceso de aire: debido a que los combustores circulantes tienen un mayor tiempo de residencia de la partícula en el lecho y una gran actividad de mezclado, pueden manejar excesos de aire inferiores a los de un combustor burbujeante.
- 4) Control en la variación de carga: de acuerdo a lo señalado anteriormente, los combustores circulantes tienen un mejor control ante la variación de carga.
- 5) Retención de SO_2 : en este aspecto ambos combustores presentan las mismas características, aunque los lechos fluidizados circulantes requieren menores relaciones Ca/S.

En la tabla 4.1. se muestran algunos valores de las comparaciones realizadas.

Tabla 4.1.
Comparación de las principales características
de combustores de lecho fluidizado¹.

Característica.	Combustor Burbujeante.	Combustor Circulante.
Altura del lecho (m)	1 a 2	15 a 40
Exceso de aire (%)	20 a 25	10 a 20
Eficiencia de combustión (%)	90 a 96	95 a 99
SO ₂ capturado (%)	80 a 90	80 a 90
Relación Ca/S	2 a 3	1 a 1.5

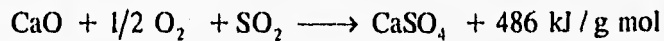
4.6. Ventajas sobre los sistemas de combustión convencionales.

Las principales ventajas que presenta un combustor de lecho fluidizado sobre un sistema convencional de combustión son las siguientes:

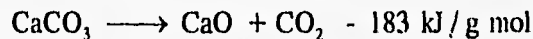
- 1) Disminución de las emisiones de SO_x y NO_x: este hecho se debe principalmente a dos factores:
 - La temperatura relativamente baja con que opera el combustor (700-900 °C) no favorece la formación de NO_x térmico; su presencia es significativa a temperaturas superiores a los 1000 °C.
 - La adición de óxido o carbonato de calcio al lecho retiene una gran parte del azufre del combustible dando lugar a la formación de sulfato de calcio.

¹Basu, Prabir and Fraser, A. Scott, 1991, *Circulating Fluidized Bed Boilers, Design and Operations*, Butterworth-Heinemann, U.S.A., pp. 12.

La reacción química, empleando óxido de calcio (cal), es la siguiente:



Cuando se emplea piedra caliza, el carbonato de calcio tiene que ser transformado en CaO por medio de la siguiente reacción endotérmica de descomposición :



De las reacciones anteriores es posible observar que la cantidad de calor liberado por la reacción de sulfatación es 2.5 veces mayor que el calor suministrado para la descomposición del CaCO_3 en CaO , por lo que la retención del azufre no es un proceso que le reste energía al lecho sino por el contrario, contribuye en la generación de la misma. Cabe resaltar que a estas consideraciones hace falta agregar la cantidad de calor que requiere el CaCO_3 para alcanzar su temperatura de descomposición (considerando una concentración del 15 % de CO_2 en los gases de combustión, la temperatura de descomposición del CaCO_3 es de aproximadamente 770 °C).

- 2) Flexibilidad en el combustible empleado: la gran actividad de mezclado existente en los combustores de lecho fluidizado, les permite dispersar y calentar rápidamente el combustible, hasta su temperatura de ignición, sin un decremento significativo en la temperatura del lecho, por ello es posible quemar distintos tipos de combustibles prescindiendo del uso de un combustible auxiliar, salvo para calentar el lecho al inicio de la operación.
- 3) Alta eficiencia de combustión: en el lecho, la cantidad de partículas inquemadas disminuye sensiblemente, en comparación con los sistemas de combustión convencionales, gracias a su alta actividad de mezclado.
- 4) Altos coeficientes de transferencia de calor: son debidos al gran movimiento de las partículas en el lecho. Dado que los combustores de lecho fluidizado presentan altos coeficientes de transferencia de calor, su tamaño es menor, para una generación de vapor dada, al de los equipos de combustión convencionales.
- 5) Disminución de los problemas de mantenimiento: al operar el combustor de lecho fluidizado con temperaturas inferiores a las de los sistemas convencionales, los problemas de escoriación causados por la ceniza fundida disminuyen.

4.7. Desventajas.

Las desventajas que presenta un combustor de lecho fluidizado son las siguientes:

- 1) Erosión de los tubos: constituye uno de los principales problemas del uso de este tipo de combustores, ya que la pérdida de material debida al movimiento de las partículas en el lecho, ocasiona que los tubos tengan que remplazarse por problemas de erosión.

Algunas soluciones propuestas a este problema son:

- Uso de tubos con mayor espesor al requerido.
- Soldar placas alabeadas sobre los tubos.

- 2) Tiempo de respuesta a variaciones de carga: debido a las características del lecho, su tiempo de respuesta a la variación en la alimentación de combustible es mayor comparado con el de los sistemas de combustión convencionales.

En un sistema convencional al variar la alimentación de combustible, por necesidades de operación, su respuesta es prácticamente inmediata, mientras que en un lecho fluidizado la respuesta a la variación de carga es lenta debido a que el lecho, por sus características de mezclado, necesita cierto tiempo para alcanzar las nuevas condiciones de operación.

Este problema se ha tratado de disminuir por medio de los siguientes procedimientos:

- Modulación de aire (variación en la velocidad de fluidización).
- Uso de cambiadores de calor ubicados entre el lecho y el ducto de recirculación de partículas (este dispositivo se emplea principalmente en combustores de lecho fluidizado circulante).

Capítulo 5.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

5.1. Combustor de lecho fluidizado circulante del I.I.E.

El combustor de lecho fluidizado del Instituto de Investigaciones Eléctricas es un prototipo experimental diseñado con las siguientes características generales:

Potencia térmica: 0.5 MW (42.47 kg combustóleo/h, considerando el PCS)

Tipo: atmosférico circulante.

Geometría: cilíndrica.

Área del lecho: 0.0863 m² (d = 0.3316 m)

Altura total: 5.5 m

Temperatura del lecho: entre 700 y 900 °C

Plato distribuidor: toberas de orificios múltiples.

Número de toberas: 51 con 8 orificios cada una.

5.2. Secciones del combustor de lecho fluidizado circulante.

Las secciones que comprenden al combustor de lecho fluidizado circulante son:

- ◆ Alimentación de combustóleo.
- ◆ Alimentación de aire.
- ◆ Lecho fluidizado.
- ◆ Separador gas-sólido.
- ◆ Enfriamiento de los gases de combustión.
- ◆ Análisis y tratamiento de los gases de combustión.

♦ Sección de alimentación de combustóleo.

La alimentación de combustóleo al combustor de lecho fluidizado se realiza bombeando combustóleo del tanque de almacenamiento al tanque diario de alimentación, por medio de una bomba de engranes. El combustóleo se calienta previamente a través de resistencias eléctricas ubicadas en el tanque y a la descarga de la bomba.

Del tanque diario se alimenta combustóleo al inyector ubicado en el centro del plato distribuidor de aire; en el inyector, el combustóleo es arrastrado hacia arriba por una corriente de aire presurizado que pasa a través de una tobera, al llegar a la parte superior del inyector, la mezcla aire/combustible sale por los orificios radiales y se distribuye en todo el lecho, en la figura 5.1 se muestra un esquema del inyector.

♦ Sección de alimentación de aire.

Consta de un ventilador centrífugo de tiro forzado de 25 HP, figura 5.2, que suministra aire al combustor de lecho fluidizado y al quemador de arranque.

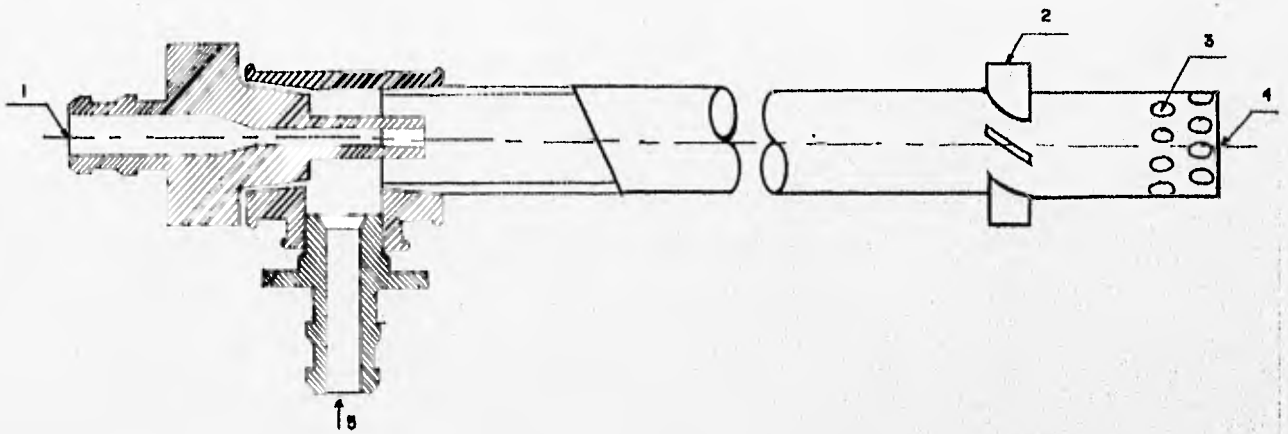
El aire proveniente del ventilador llega a la caja de aire que se encarga de alimentarlo a una presión constante al plato distribuidor, donde se encuentran las toberas que distribuyen el aire de manera uniforme para lograr la fluidización del lecho y la combustión, así como un orificio en el centro que permite la introducción del inyector de combustóleo; en la figura 5.3 se muestran las toberas y el plato distribuidor.

Una parte del aire suministrado por el ventilador de tiro forzado es empleado para la combustión de gas L. P. en el quemador de arranque, su función es calentar el lecho desde 25 °C a una temperatura de aproximadamente 500 °C, una vez alcanzada dicha temperatura se alimenta combustóleo al combustor y se cierra el suministro de gas L. P.

♦ Sección del lecho fluidizado.

Consta de cuatro módulos que son:

- 1) Módulo distribuidor: sección cilíndrica con refractario y aislante donde se realiza la alimentación de combustóleo; se encuentra ubicado entre el plato distribuidor y el quemador de arranque.
- 2) Módulo de recirculación: sección cilíndrica con refractario donde se reciben los sólidos recirculados; se encuentra ubicado entre el quemador de arranque y el módulo de enfriamiento. En la figura 5.4 se muestran los módulos 1 y 2 del lecho fluidizado.



- 1- ENTRADA DE AIRE COMPRIMIDO
- 2- ASPAS INCLINADAS 45°
- 3- 16 ORIFICIOS
- 4- TAPA SOLDADA
- 5- ENTRADA DE COMBUSTIBLE

Figura 5.1. Inyector de combustible.

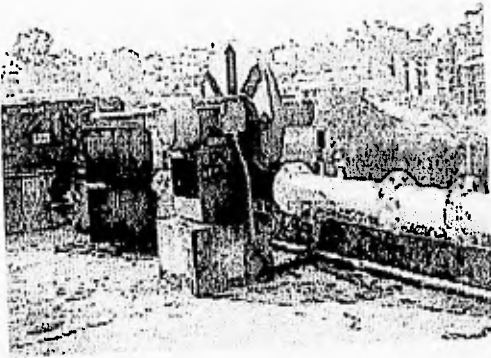


Figura 5.2. Ventilador de tiro forzado.

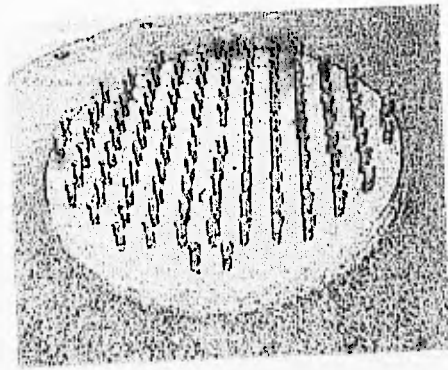


Figura 5.3. Plato distribuidor y toberas.

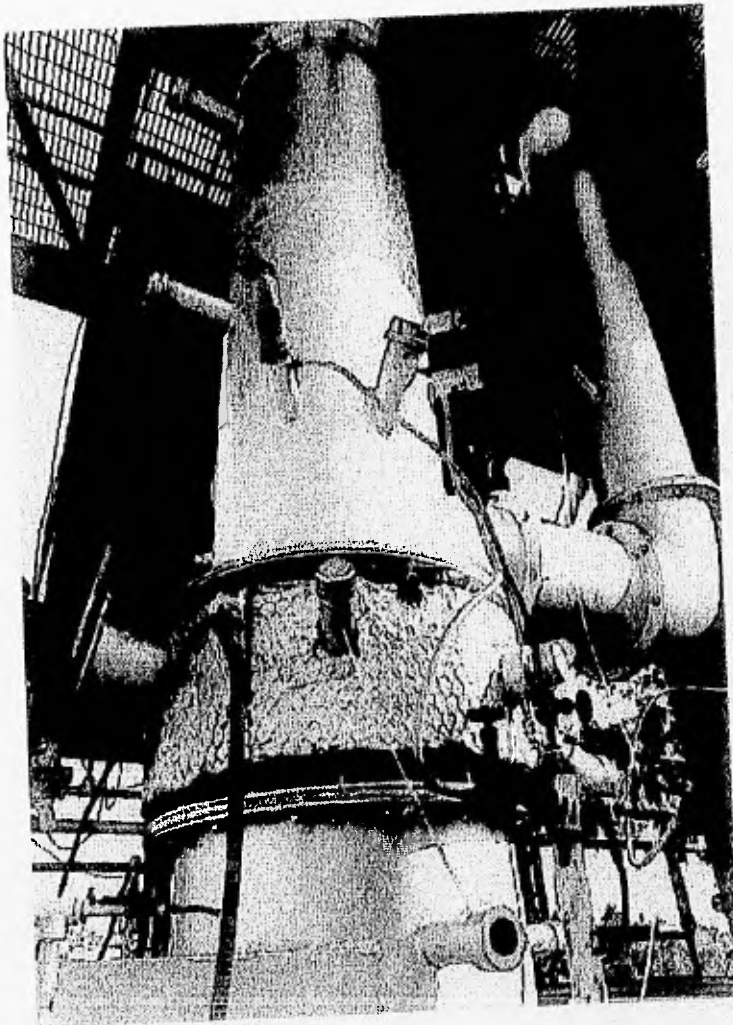


Figura 5.4. Módulo 1 y 2.

- 3) Módulo de enfriamiento: sección cilíndrica con camisa de agua, permite mantener la temperatura en el combustor dentro del rango deseado; se encuentra ubicado entre el módulo de recirculación y el de salida de gases.
- 4) Módulo de salida de gases: sección cilíndrica con refractario, posee una salida lateral de sección rectangular que se une a la entrada del ciclón; se encuentra ubicado en la parte superior del combustor, encima del módulo de enfriamiento. En la figura 5.5 se muestran los módulos 3 y 4 del lecho fluidizado.

♦ Sección del separador gas-sólido.

La corriente ascendente que proviene del lecho, trae consigo gases de combustión y sólidos; para separarlos se emplea un separador de tipo ciclónico ubicado en la parte superior del combustor. Por la parte inferior del ciclón salen los sólidos y son alimentados a una válvula no mecánica de tipo "L" que los recircula al lecho; por la parte superior salen los gases de combustión, que son dirigidos hacia el colector de polvos, como se muestra en las figura 5.6.

♦ Sección de enfriamiento de los gases de combustión.

El sistema de enfriamiento del combustor de lecho fluidizado opera en circuito cerrado; el agua de enfriamiento es suministrada por una bomba centrífuga que succiona agua de la torre de enfriamiento de tiro inducido y alimenta al cabezal de agua de enfriamiento, figura 5.7.

Del cabezal de agua de enfriamiento se alimenta: la camisa de agua del módulo de enfriamiento, al cambiador de calor de bayoneta del combustor y al banco de tres cambiadores de calor ubicados en la salida superior del ciclón, figura 5.8. El cambiador de calor de bayoneta no se habilitó para las pruebas realizadas.

Las corrientes de salida de los equipos de enfriamiento se unen y forman el cabezal de retorno (agua caliente) que alimenta a la torre de enfriamiento, cerrándose así el circuito de enfriamiento.

♦ Sección de análisis y tratamiento de los gases de combustión.

Una vez enfriados los gases de combustión se pasan a través de un filtro de bolsas con el fin de eliminar partículas sólidas, posteriormente son mandados a la chimenea por medio de un ventilador de tiro inducido. De la corriente de los gases de combustión se extrae continuamente una muestra para analizar el porcentaje de oxígeno y la concentración (en partes por millón) de CO y SO_2 que contienen los gases de combustión, figura 5.9.

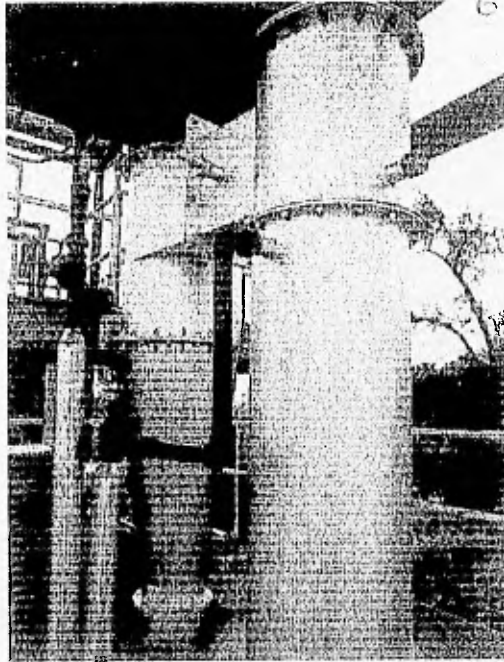


Figura 5.5. Módulo 3 y 4.

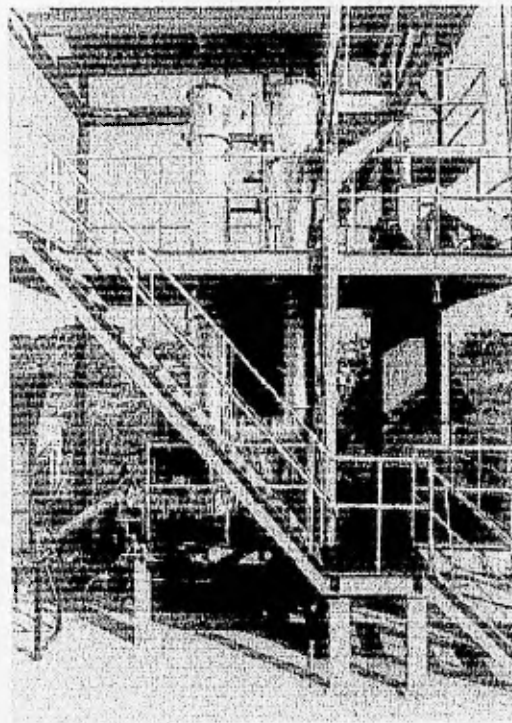


Figura 5.6. Vista lateral del combustor.



Figura 5.7. Torre de enfriamiento.

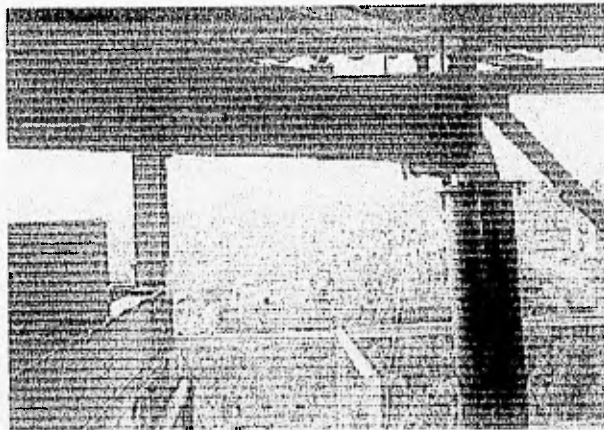


Figura 5.8. Cambiadores de calor.

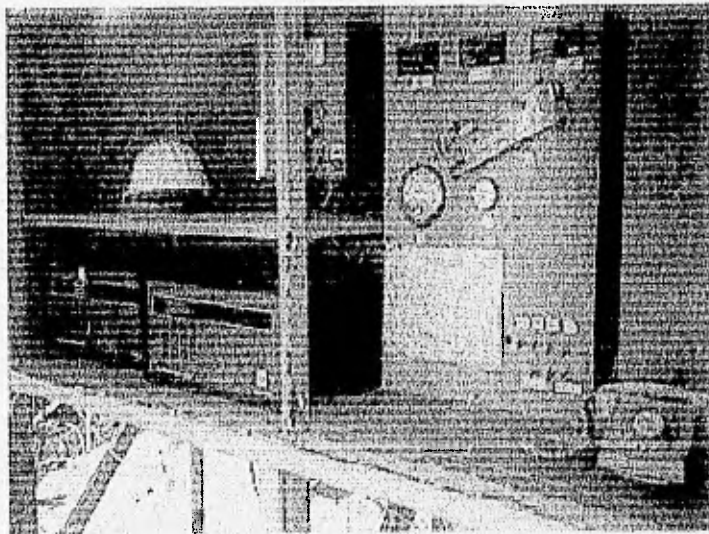


Figura 5.9. Arbolizadores de gases.

Para la determinación de CO y SO₂ se emplea un analizador infrarrojo no dispersivo, su principio de operación se basa en la medición diferencial de absorción de la energía infrarroja.

En la figura 5.10 se muestra el diagrama funcional del sistema de detección. Dentro del analizador, dos haces de energía infrarroja son dirigidos a través de dos celdas, una por donde fluye la muestra y otra que contiene un gas neutro (por ejemplo nitrógeno) y que constituye la celda de referencia.

Durante la operación una parte de la radiación infrarroja es absorbida por el componente de interés en la muestra. Un detector eléctrico, mide continuamente la diferencia entre las cantidades de energía infrarroja absorbida por el componente de interés y la celda de referencia. Esta diferencia es una medida de la concentración del componente de interés.

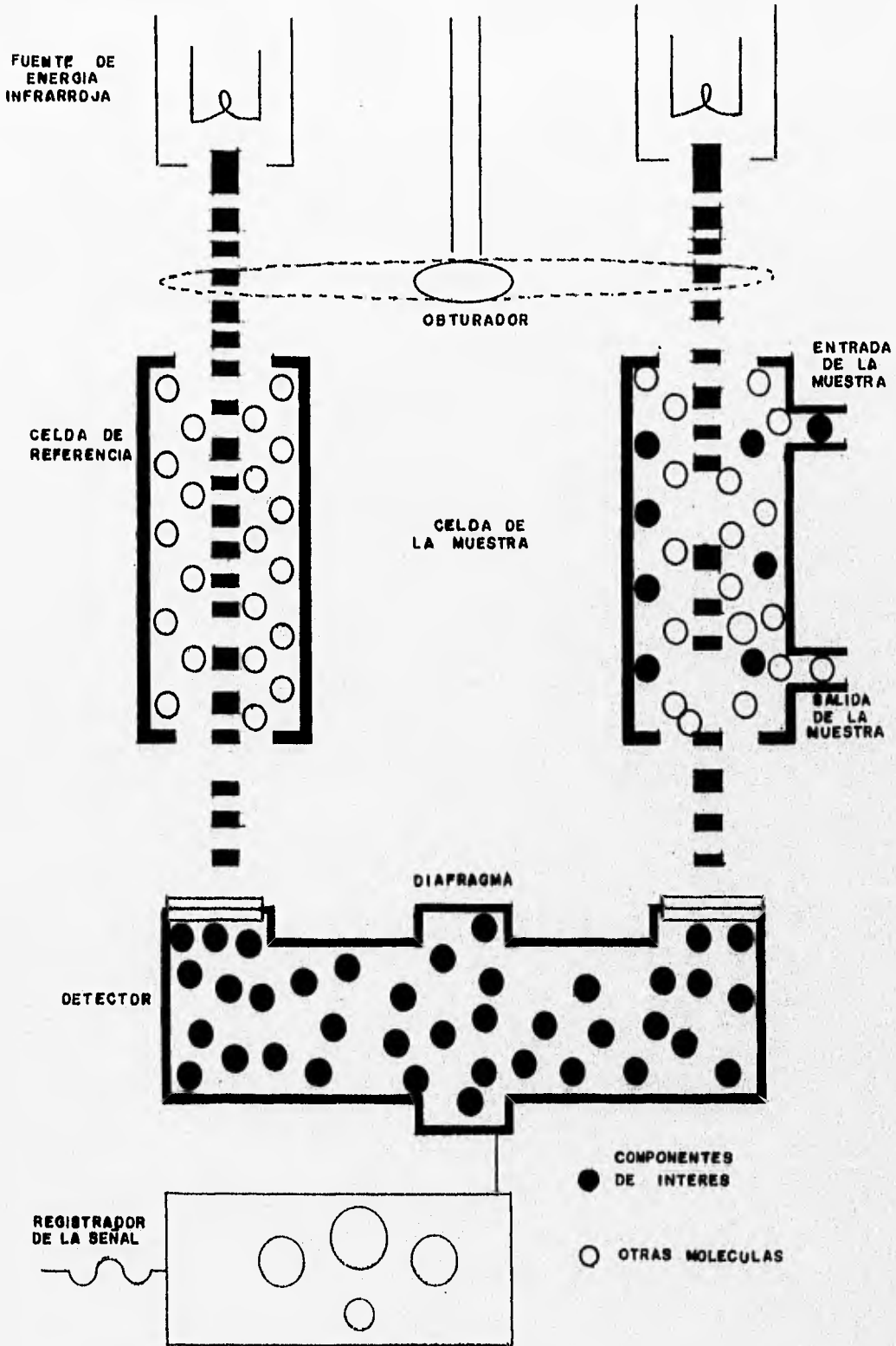


Figura 5.10. Diagrama funcional del sistema de detección infrarroja.

La medición del oxígeno se realiza por medio de un analizador paramagnético; su principio de operación está basado en la capacidad del oxígeno para ser magnetizado temporalmente cuando se encuentra en un campo magnético, debido al par de electrones libres en su última órbita.

En la figura 5.11 se ilustra la operación del equipo; un par de esferas de vidrio llenas de nitrógeno son montadas en los extremos de una barra de aluminio-níquel, formando el cuerpo de prueba. El cuerpo de prueba va montado horizontalmente sobre una suspensión vertical de torsión. El cuerpo de prueba se coloca en un campo magnético, por el que se hace pasar la muestra de gas. Las esferas se ven entonces sometidas a fuerzas de desplazamiento que provocan un par de torsión proporcional a la susceptibilidad magnética del volumen de gas en los alrededores del campo de prueba.

La susceptibilidad magnética del flujo de gas analizado se mide utilizando un detector magnético de la siguiente manera:

En el centro del campo de prueba hay un pequeño espejo de cuarzo, sobre el cual se enfoca un haz de luz que se refleja sobre una fotocelda. La señal producida por la fotocelda se aplica a la entrada de un circuito amplificador, el cual provee la corriente restauradora a través de un alambre conductor, unido longitudinalmente alrededor de las esferas.

Adicionalmente, la señal de salida del amplificador se envía al medidor y al registrador. La corriente restauradora da origen a una fuerza electromagnética, la cual provoca el par restaurador. Este par es igual pero de sentido contrario al par de desplazamiento en las esferas.

La corriente requerida para restaurar el cuerpo de prueba a la posición cero (inicial), es directamente proporcional al par de desplazamiento original y este es una función lineal de la susceptibilidad magnética del volumen de gas muestreado, la cual a su vez es proporcional a la concentración de O_2 del gas analizado.

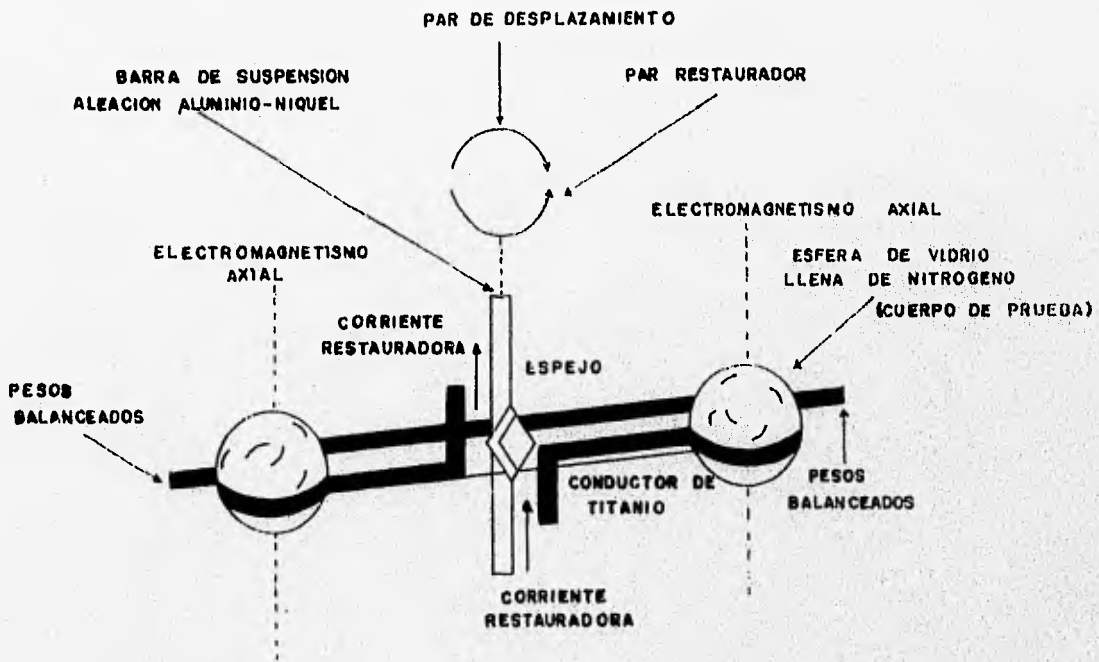


Figura 5.11. Diagrama funcional del sistema paramagnético.

Capítulo 6.

EXPERIMENTACIÓN.

6.1. Trabajo experimental.

6.1.1. Caracterización del material del lecho.

Durante la realización de la parte experimental se determinó el diámetro de la arena sílica (material base del lecho) y del carbonato de calcio (cero grueso). En las tablas 6.1. y 6.2. se muestran los valores obtenidos:

Tabla 6.1.

Granulometría de la arena sílica.

Número de Tamiz	Peso de la muestra (g)	Abertura del tamiz (m)	d_p (m)	% retenido
10	1.6	0.00168	-	0.16
16	383	0.00113	0.001405	38.3
18	202.7	0.001	0.001065	20.27
20	223.5	0.0008	0.0009	22.35
30	161.7	0.00059	0.000695	16.17
40	15.2	0.00042	0.000505	1.52
60	3.5	0.00025	0.000335	0.35
Resto	8.8		-	
	<hr/> Total = 1,000			

diámetro medio de las partículas:

$$d_p = 0.001076 \text{ m}$$

Tabla 6.2.

Granulometría del cero grueso (carbonato de calcio).

Número de Tamiz	Peso de la muestra (g)	Abertura del tamiz (m)	d_p (m)	% retenido
8	4.6	0.00238	-	0.46
10	65.2	0.00168	0.00203	6.52
16	523.3	0.00113	0.001405	52.33
18	112.2	0.001	0.001065	11.22
20	128.2	0.0008	0.0009	12.82
30	113.9	0.00059	0.000695	11.39
Resto	52.6			
	<hr/> Total = 1,000			

diámetro medio de las partículas:

$$d_p = 0.00118 \text{ m}$$

6.1.2. Pruebas realizadas.

La experimentación comprendió un total de 10 pruebas, divididas en dos series.

- Serie 1.

Pruebas de factibilidad.

Se realizaron 5 corridas experimentales, con los siguientes objetivos:

- ♦ Determinar el buen funcionamiento de los equipos.
- ♦ Lograr la combustión autosostenida del combustóleo.
- ♦ Eliminar la humedad remanente en el refractario y disminuir la concentración de los elementos presentes en él, que pudieran reaccionar con el bióxido de azufre (la composición química de los refractarios incluye el óxido de calcio).
- ♦ Definir las mejores condiciones de operación para el combustible en estudio.

- Serie 2.

Influencia de la relación Ca/S sobre las emisiones de SO₂.

El propósito de realizar estas pruebas, consiste en determinar el efecto de la adición de carbonato de calcio al lecho sobre las emisiones de bióxido de azufre, con distintas relaciones Ca/S (desde 1 hasta 4.5).

- Variables de operación.

Las mediciones se realizaron cada cinco minutos, una vez que el equipo alcanzó un régimen estable; las variables registradas fueron las siguientes:

Variable.	Unidad.
Tiempo de la medición.	(h : min)
Flujo de combustóleo (F _c).	(kg/h)
Temperaturas de los módulos del lecho (T ₁ , T ₂ , T ₃ y T ₄).	(°C)
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T ₅).	(°C)
Temperatura del combustóleo (T _{comb.}).	(°C)
Presión del combustóleo (P _{comb.}).	(Pa)
Presión del aire de atomización (P _{aire atom.}).	(Pa)
Concentración de O ₂ en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)
Concentración de SO ₂ en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)
Caída de presión en el lecho (ΔP _{l.f.}).	(Pa)
Temperatura del aire de fluidización (T _{a.f.}).	(°C)

6.1.3. Parámetros calculados.

Para cada una de las pruebas experimentales realizadas se calcularon los siguientes parámetros:

6.1.3.1. Flujo de combustóleo.

Su flujo se calculó a través de un tanque aforado (tanque diario de alimentación), midiendo su nivel al inicio y al final de la prueba.

$$F_c = \frac{\Pi \times r^2 (h_i - h_f) \times \rho_{\text{comb.}} \times 60}{\text{minutos operando con combustóleo}} \quad (\text{A.16})$$

Donde

$$\begin{aligned} F_c &= \text{Flujo de combustóleo [kg comb./h]} \\ r &= \text{radio del tanque (0.20 m)} \\ h_i \text{ y } h_f &= \text{Nivel inicial y final del tanque [m]} \\ \rho_{\text{comb.}} &= \text{Densidad del combustóleo [kg/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

6.1.3.2. Exceso de aire.

$$\% \text{ EA} = 94.395 \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \quad (\text{A.1})$$

6.1.3.3. Flujo de aire.

$$F_a = 13.5124 \text{ kg/kg comb.} \times F_c \left(1 + \frac{\% \text{ EA}}{100} \right) \quad (\text{A.13})$$

Donde

$$\begin{aligned} F_a &= \text{Flujo de aire [kg/h]} \\ F_c &= \text{Flujo de combustible [kg/h]} \\ \text{EA} &= \text{Exceso de aire} \end{aligned}$$

6.1.3.4. Velocidad de fluidización (referida al aire).

$$v_f = \frac{F_a}{310.68 \times \rho_a} \quad (\text{A.15})$$

Donde

 F_a = Flujo de aire [kg/h] v_f = Velocidad de fluidización [m/s] ρ_a = Densidad del aire a la temperatura promedio del lecho [kg/m³]Temperatura promedio del lecho = $\frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$ [°C]

6.1.3.5. Relación Ca/S.

$$\frac{\text{Ca}}{\text{S}} = 0.8 \text{ kg S/kg Ca} \left(\frac{F_b \times C_{Ca}}{F_c \times C_s} \right) \quad (\text{A.12})$$

Donde

 $\frac{\text{Ca}}{\text{S}}$ = Relación Ca/S (adimensional) F_b = Flujo de aditivo (carbonato de calcio) [kg/h] F_c = Flujo de combustible [kg/h] C_{Ca} = Concentración de Ca en el aditivo [kg Ca/kg aditivo] C_s = Concentración de S en el combustible [kg S/kg combustible]6.1.3.6. Concentración de SO₂ normalizada al 5 % de O₂.

$$\text{ppm SO}_2 \text{ (5 \% O}_2\text{)} = \text{ppm SO}_2 \text{ (\% O}_2\text{)} \times 0.7619 \left(1 + \frac{\% \text{ O}_2}{21 - \% \text{ O}_2} \right) \quad (\text{A.10})$$

6.1.3.7. Porcentaje de SO₂ retenido en el lecho.

$$\% \text{ SO}_2 \text{ ret.} = \frac{1,953.53 - \text{ppm SO}_2 \text{ (5 \% O}_2\text{)}}{1,953.53} \times 100 \quad (\text{A.11})$$

6.1.4. Procedimiento de arranque y paro.

6.1.4.1. Procedimiento de arranque.

1. Energizar equipos, encender los medidores de temperatura y los analizadores de gases (deben calentarse entre una hora y hora y media, para ser calibrados).
2. Alinear válvulas para suministrar aire presurizado al inyector de combustóleo; verificar voltaje en el compresor, si se encuentra arriba de 221 V en las tres fases, encenderlo.
3. Encender resistencias calentadoras del tanque de almacenamiento de combustóleo y de la bomba de engranes.
4. Alinear válvulas para alimentar al tanque diario de combustóleo.
5. Encender la bomba de engranes; cuando el combustóleo llegue al nivel deseado en el tanque diario alinear las válvulas para que se recircule.
6. Cuando se esté recirculando el combustóleo cerrar la válvula del tanque de almacenamiento de combustóleo y apagar su resistencia calentadora, la de la bomba de engranes se deja encendida.
7. Verificar que el depósito de agua de la torre de enfriamiento se encuentre lleno.
8. Verificar que las válvulas de las líneas de alimentación de agua a los cambiadores de calor estén alineadas, así como las válvulas de la línea de retorno a la torre de enfriamiento.
9. Encender el ventilador de la torre de enfriamiento y la bomba de alimentación de agua.
10. Encender el ventilador de tiro forzado.
11. Encender el ventilador de tiro inducido.
12. Abrir la válvula del gas y la válvula de cuchilla del quemador, encenderlo y observar si encendió o no a través de la mirilla ubicada entre el quemador y el combustor.
13. Conectar el ducto de toma de muestra de los gases de combustión a la bomba, encenderla y regular el flujo de gases a los analizadores por medio del rotámetro (debe indicar entre 100 y 110).

14. Cuando la temperatura en el módulo de recirculación (T_2) sea de entre 450 y 500 °C, abrir gradualmente la válvula de alimentación de combustóleo, observar a través de la mirilla del combustor la presencia de partículas incandescentes, cuando se alcance una temperatura en el módulo de recirculación (T_2) de entre 800 y 830 °C apagar el quemador de gas.
15. Ajustar el flujo de combustóleo y de aire para obtener las condiciones de operación deseadas.

6.1.4.2. Procedimiento de paro.

1. Cerrar la válvula de alimentación de combustóleo.
2. Limpiar la línea de alimentación de combustóleo con aire presurizado.
3. Apagar la resistencia calentadora de la bomba de engranes.
4. Apagar la bomba de engranes.
5. Desconectar el ducto de toma de muestra de gases de combustión de la bomba, permitiendo que succione aire para limpiar los ductos de los analizadores de gases, realizar esto durante 15 minutos.
6. Apagar la bomba de toma de muestra y los analizadores de gases.
7. Cuando la temperatura del módulo de recirculación (T_2) disminuya hasta 600-500 °C, apagar el ventilador de tiro forzado y dejar encendido el de tiro inducido para que el equipo se enfríe lentamente.
8. Cuando la temperatura se encuentre alrededor de 100 °C apagar el ventilador de tiro inducido, la bomba y el ventilador de la torre de enfriamiento.
9. Apagar el compresor y desenergizar.

6.1.5. Análisis estadístico de los datos experimentales.

Las lecturas tomadas de cada una de las variables, fueron sometidas a un tratamiento estadístico aplicando el criterio de Chauvenet (Holman, 1966) con el fin de determinar su consistencia y depurar las lecturas de las distintas variables eliminando datos inconsistentes; por último, con los datos depurados, se calculó la media y la desviación estándar.

En el presente trabajo se eliminaron 52 datos de un total de 2,517; los valores calculados fueron obtenidos a partir de las fórmulas mencionadas en el apéndice A y con la media de los datos depurados.

6.1.6. Concentración máxima permisible de bióxido de azufre en los gases de combustión.

Con el propósito de tener un marco de referencia para los resultados que se generaron durante la experimentación, se muestra la tabla 6.3. con las concentraciones máximas permisibles de emisiones de bióxido de azufre para la zona metropolitana de la ciudad de México, las zonas críticas y el resto de la república (NOM-085-ECOL-1994).

Tabla 6.3.

Concentraciones máximas permisibles de bióxido de azufre (ppm en vol. y 5 % de O₂)

Zona metropolitana de la ciudad de México.	Zonas críticas.	Resto del país.
1100	2100	2600

6.2. Resultados experimentales.

6.2.1. Resultados obtenidos de las pruebas de la serie 1.

La realización de las pruebas de la serie 1 constituyen el inicio de la operación del combustor de lecho fluidizado circulante, pues el equipo nunca había sido operado anteriormente.

Durante la realización de estos ensayos se tuvieron problemas en la operación del combustor, debido a que el sistema de recirculación de sólidos no funcionaba adecuadamente, pero se logró una operación satisfactoria para la serie 2.

En las siguientes páginas se presentan los resultados experimentales obtenidos en la serie 1.

Serie 1:

♦ Prueba 1

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	25.12	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	808.45	18.84
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	826.36	23.79
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	749.90	77.33
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	554.30	17.51
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	92.55	11.09
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	78.09	0.83
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	75,842.32	0
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	17.60	0.21
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	494.80	152.43
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	58	10.83
Cafda de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	*	*
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	68.36	0.50

* No se encontraba habilitado el manómetro.

Serie 1:

♦ Prueba 1

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	488.632
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	1,998.63
Temperatura promedio del lecho. (°C)		794.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	19.35

Serie 1:

♦ Prueba 2

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	30.15	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	826.67	24.17
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	870	33.15
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	807.33	32.74
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	559.67	20.03
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	106.50	19.15
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	81	0
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	68,947.57	0.57
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	9.17	0.76
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	7,824	568.34
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	263.67	69.00
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	*	*
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	65.67	4.72

* No se encontraba habilitado el manómetro.

Serie 1:

♦ Prueba 2

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	73.17
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	705.63
Temperatura promedio del lecho. (°C)		834.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	7.19

Serie 1:

♦ Prueba 3

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	30.15	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	771.08	7.48
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	833.16	7.28
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	794.83	6.45
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	617.09	5.3
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	190	5.35
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	82	1.04
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	62,052.81	0.40
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	10.16	0.38
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	2,947.42	342.07
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	440.83	49.69
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{lf.}$).	(Pa)	*	*
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	58.81	0.60

* No se encontraba habilitado el manómetro.

Serie 1:

♦ Prueba 3

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	88.47
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	767.99
Temperatura promedio del lecho. (°C)		799.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	7.61

Serie 1:

♦ Prueba 4

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	39.85	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	800.09	11.30
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	851.67	9.84
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	816.45	10.85
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	636.18	19.16
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	290.70	8.77
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	85.41	1.16
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	55,158.05	0.90
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	9.36	0.77
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	1,121.18	627.54
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	777.18	66.30
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l,r}$).	(Pa)	1,716.11	0
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a,f}$).	(°C)	62.72	1.00

Serie 1:

♦ Prueba 4

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	75.03
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	942.54
Temperatura promedio del lecho. (°C)		822.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	9.58

Serie 1:

♦ Prueba 5

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	28.10	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	824.57	4.73
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	867.60	4.14
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	826.40	4.21
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	658.95	14.17
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	226.20	5.63
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	78.85	3.26
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	55,158.05	1.04
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	10.11	0.23
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	1,244.86	71.85
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	1,045.61	36.97
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{lf.}$).	(Pa)	1,274.82	1.27
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	65.15	0.36

Serie 1:

♦ Prueba 5

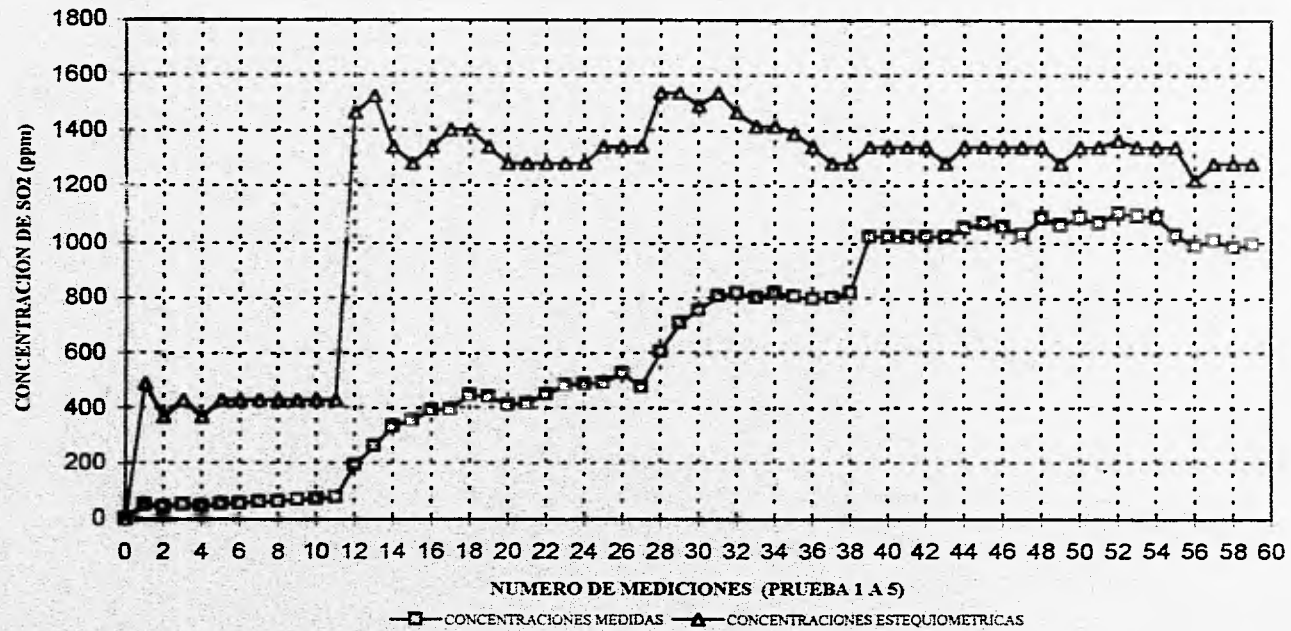
Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	87.63
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	712.64
Temperatura promedio del lecho. (°C)		839.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	7.39

La prueba empleada como base de referencia para la realización de la serie 2 fue la prueba 5, debido a las siguientes razones:

- ♦ El perfil de temperaturas obtenido en este ensayo es el adecuado para una buena combustión del combustóleo, entre 860-880 °C, (Milán, 1992).
- ♦ La concentración de los componentes del refractario, que podrían reaccionar con el SO_2 producido, disminuyó sensiblemente, pues las emisiones de SO_2 en este ensayo fueron las más altas, como se muestra en la figura 6.1.
- ♦ Las condiciones de operación del ensayo 5 son las más estables de todas las pruebas anteriores, y como consecuencia tiene las desviaciones estándar más bajas en relación a los demás ensayos.

FIGURA 6.1. SECUENCIA DE CONCENTRACIONES DE SO₂ (MEDIDAS Y CALCULADAS).



Considerando lo anterior, las condiciones de operación que se procuraron mantener para la serie 2 fueron las siguientes:

Variable.	Unidad.	Valor.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	28.10
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	712.64
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	867.60

6.2.2. Resultados obtenidos de las pruebas de la serie 2.

En esta serie se efectuaron 5 pruebas, con distintas relaciones Ca/S (desde 1 hasta 4.5); debido a problemas en la recirculación de sólidos, la prueba para Ca/S = 2 se repitió. Se tomó como punto de referencia experimental la concentración de SO₂ obtenida en el ensayo 5 de las pruebas de factibilidad.

El carbonato de calcio se alimentó al lecho a través de un puerto lateral del combustor, ubicado en el módulo de recirculación.

En las siguientes páginas se muestran los resultados obtenidos.

Serie 2.

♦ Prueba 1

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	29.66	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	815.76	6.79
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	865.05	3.54
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	830.57	7.40
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	683.73	11.16
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	222.20	3.84
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	76.90	1.84
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	75,842.32	0.77
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	14.02	0.29
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	621.13	86.04
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	582.38	24.69
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	353.02	0.75
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	64.72	0.45

Serie 2:

♦ Prueba 1

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	188.79
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	1,157.59
Temperatura promedio del lecho.	(°C)	837.33
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	11.79
Concentración de SO ₂ normalizada a un 5 % de O ₂ .	(ppm en vol.)	1,330.27
% de SO ₂ retenido.	%	31.90
Flujo de aditivo (F_b).	(kg/h)	3.19
Relación Ca/S real.	Adimensional	0.947

Serie 2.

♦ Prueba 2

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	29.66	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	712	50.52
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	866.20	7.38
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	830.50	7.59
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	690.10	15.30
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	215.40	7.71
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	84.04	2.83
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	55,158.05	1.58
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	14.61	0.35
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	679.35	35.95
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	535.52	33.36
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	159.90	0.20
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	65.89	0.56

Serie 2:

♦ Prueba 2

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	215.33
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	1,264.01
Temperatura promedio del lecho.	(°C)	802.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	12.56
Concentración de SO ₂ normalizada a un 5 % de O ₂ .	(ppm en vol.)	1,337.49
% de SO ₂ retenido.	%	31.53
Flujo de aditivo (F_a).	(kg/h)	6.39
Relación Ca/S real.	Adimensional	1.89

Serie 2.

♦ Prueba 3

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	24.39	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	746.10	19.55
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	866.35	7.17
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	810.76	10.63
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	592.86	11.32
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	157.39	5.23
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	80.97	1.72
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	48,263.29	0.84
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	13.94	0.40
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	1,255.52	150.13
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	534.37	20.19
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	1,667.08	0.38
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	63.34	0.89

Serie 2:

♦ Prueba 3

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	188.79
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	951.87
Temperatura promedio del lecho.	(°C)	807.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	9.50
Concentración de SO ₂ normalizada a un 5 % de O ₂ .	(ppm en vol.)	1,220.56
% de SO ₂ retenido.	%	37.52
Flujo de aditivo (F_i).	(kg/h)	9.59
Relación Ca/S real.	Adimensional	3.45

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Serie 2.

♦ Prueba 4

Objetivo: Señalados en 6.1.2.

Valores medidos.

Variable.	Unidad.	Valor medio.	Desviación estándar.
Flujo de combustóleo (F_c).	(kg/h)	24.93	0
Temperatura del módulo distribuidor (T_1).	(°C)	740.03	10.36
Temperatura del módulo de recirculación (T_2).	(°C)	865.81	10.42
Temperatura a la entrada del módulo de enfriamiento (T_3).	(°C)	828.53	7.70
Temperatura de la sección rectangular del módulo de salida de gases (T_4).	(°C)	612.31	4.12
Temperatura a la entrada del filtro de bolsas (T_5).	(°C)	162.84	3.92
Temperatura del combustóleo ($T_{comb.}$).	(°C)	83.69	1.82
Presión del combustóleo ($P_{comb.}$).	(Pa)	48,263.29	0.70
Presión del aire de atomización ($P_{aire atom.}$).	(Pa)	137,895.14	0
Concentración de O_2 en los gases de combustión (base seca).	(% en vol.)	13.72	0.24
Concentración de CO en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	1,098.12	58.26
Concentración de SO_2 en los gases de combustión (base seca).	(ppm en vol.)	506.92	17.24
Caída de presión en el lecho ($\Delta P_{l.f.}$).	(Pa)	1,765.14	0.27
Temperatura del aire de fluidización ($T_{a.f.}$).	(°C)	65.69	0.73

Serie 2:

♦ Prueba 4

Valores calculados.

Variable.	Unidad.	Valor.
Exceso de aire (EA).	%	177.15
Flujo de aire (F_a).	(kg/h)	933.73
Temperatura promedio del lecho.	(°C)	811.66
Velocidad de fluidización (v_f).	(m/s)	9.36
Concentración de SO ₂ normalizada a un 5 % de O ₂	(ppm en vol.)	1,109.03
% de SO ₂ retenido.	%	43.22
Flujo de aditivo (F_a).	(kg/h)	12.78
Relación Ca/S real.	Adimensional	4.5

Los resultados obtenidos, referentes a las emisiones de bióxido de azufre, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6.4.

Emisiones de bióxido de azufre y relación Ca/S.

Relación Ca/S	% O ₂	SO ₂ (medido) (ppm)	SO ₂ (5% O ₂) (ppm)	% SO ₂ retenido
0	10.11	1046	1536.81	21.33
0.94	14	582	1330.27	31.90
1.89	14.6	535	1337.49	31.53
3.45	14	534	1220.56	37.52
4.5	13.7	506	1109.03	43.22

Capítulo 7.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

7.1. Factibilidad de la combustión del combustóleo en lecho fluidizado circulante.

Los resultados de la serie 1 y 2 señalan que la combustión autosostenida y estable del combustóleo, en lecho fluidizado circulante, es factible. Durante las pruebas se cubrió el siguiente intervalo de condiciones de operación:

Variable.	Unidad.	Valor mínimo.	Valor máximo.
Temperatura del combustóleo.	(°C)	77	85
Temperatura promedio del lecho.	(°C)	794.66	839.66
Velocidad de fluidización.	(m/s)	7.19	19.35
Exceso de aire.	%	73.17	488.63
Relación Ca/S.	Adimensional	0	4.5

7.2. Perfil de temperaturas en el combustor de lecho fluidizado.

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas de la serie 1, es posible observar que la temperatura en el lecho es casi homogénea (± 60 °C), como se muestra en la figura 7.1., además en la figura 7.2. se puede notar que las más altas temperaturas se alcanzan en los módulos que constituyen al lecho, lo cual indica que la combustión se realiza principalmente en esta zona.

FIGURA 7.1. SECUENCIA DE MEDICIONES DE LA TEMPERATURA DEL LECHO.

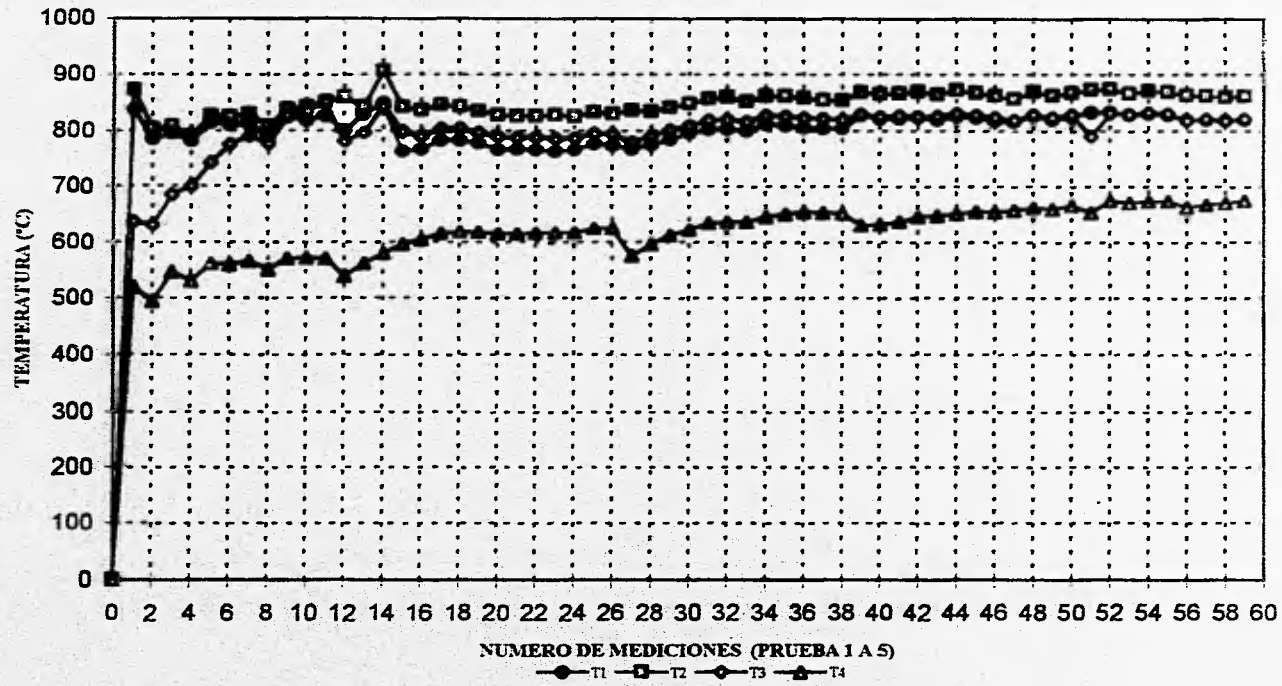
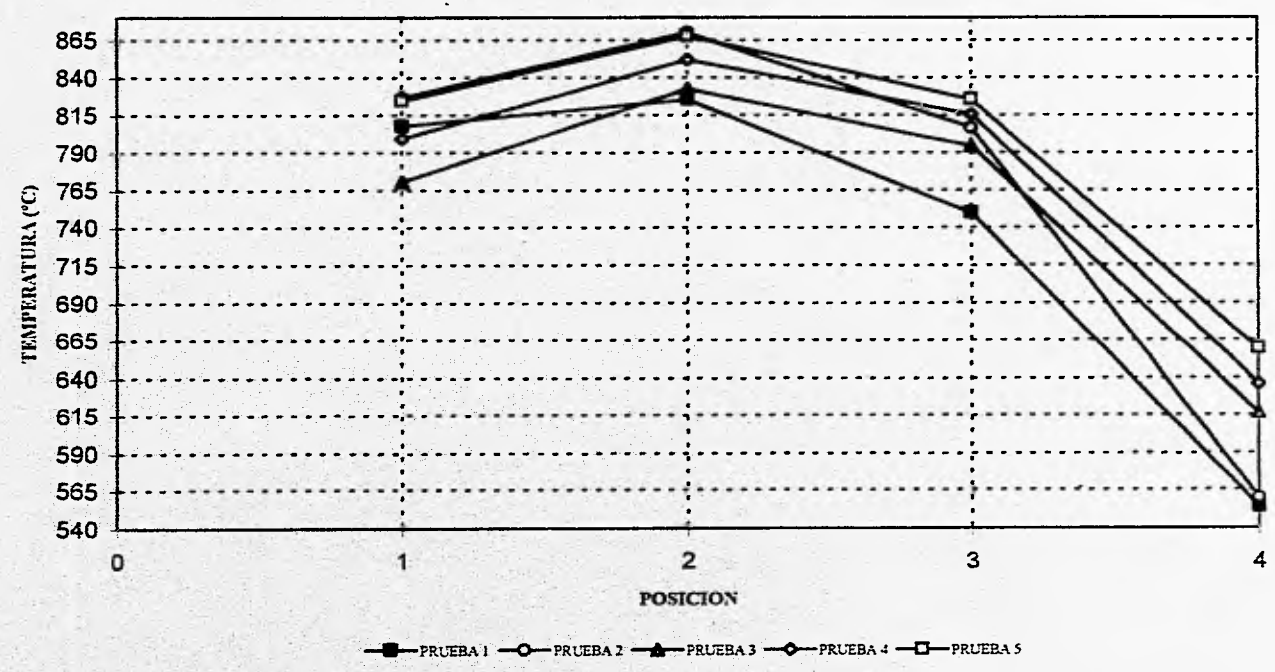


FIGURA 7.2. PERFIL DE TEMPERATURAS.



7.3. Emisiones de SO₂.

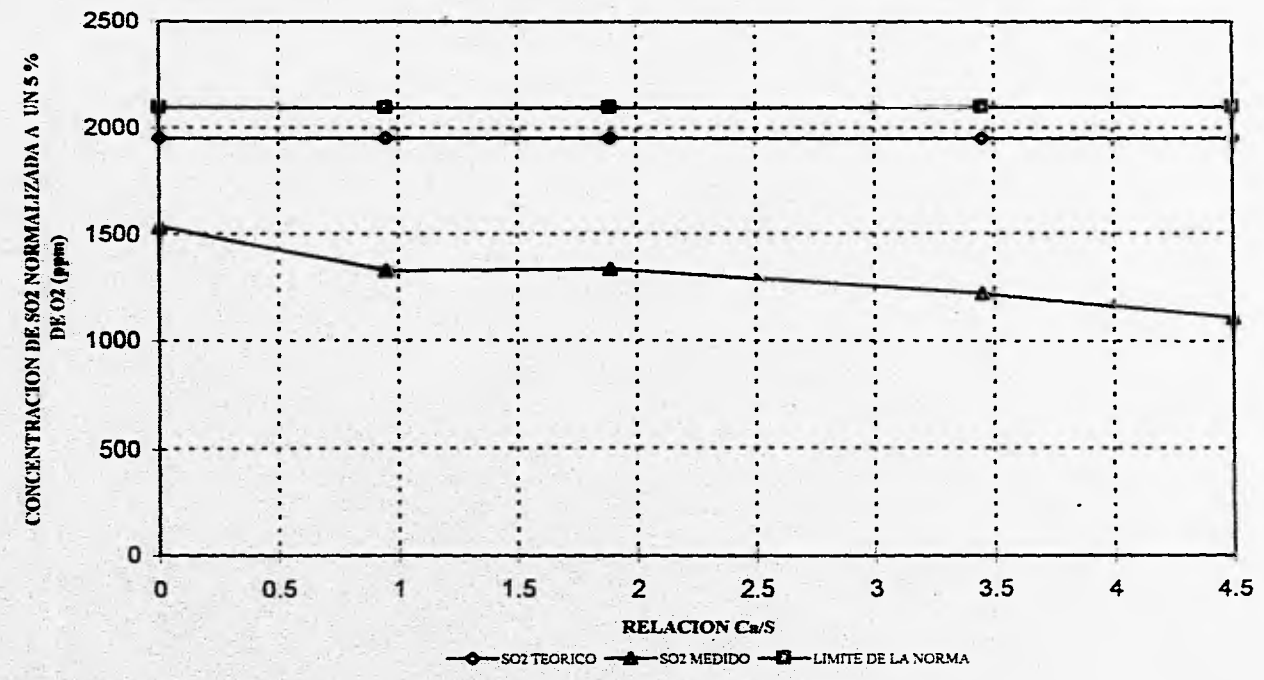
En la figura 7.3 se encuentran trazadas la concentración teórica máxima de bióxido de azufre, la concentración permitida por la norma vigente y los resultados experimentales.

Como se observa en la misma figura, las emisiones de SO₂ disminuyen a medida que la relación Ca/S aumenta, quedando por debajo de la concentración permitida por la norma referente a las zonas críticas.

Por otra parte, experiencias previas de combustión de combustóleo en lecho fluidizado burbujeante (Milán, 1992) revelan porcentajes de retención de SO₂ mayores a los encontrados en las pruebas en lecho fluidizado circulante, para relaciones Ca/S similares, la literatura indica también que en ambos tipos de combustores el porcentaje de retención de SO₂ es prácticamente el mismo (Basu, 1991).

Esta diferencia en los porcentajes de retención de SO₂ se puede atribuir a una deficiente recirculación de sólidos al lecho, ocasionando que el carbonato de calcio se acumule en el codo de la válvula "L" y que las emisiones de SO₂ no disminuyan como se esperaba.

FIGURA 7.3. EMISIONES DE BIOXIDO DE AZUFRE.



7.4. Emisiones de CO.

Con base en los resultados obtenidos de las series 1 y 2, se observa que las concentraciones de CO resultan ser elevadas; sólo en las pruebas donde se manejaron excesos de aire altos, dichas concentraciones disminuyeron. Esto indica que el mezclado aire-combustible no fue el adecuado. Como en un lecho fluidizado circulante este mezclado se debe principalmente al movimiento de las partículas del lecho, la presencia de elevadas concentraciones de CO puede también atribuirse a deficiencias en la recirculación de sólidos al lecho.

7.5. Válvula no mecánica de tipo "L".

Durante el desarrollo de la experimentación se observaron dificultades en la válvula "L" para mantener una recirculación de sólidos al lecho adecuada. La función de la válvula "L" es recircular los sólidos al lecho continuamente (Apéndice B) de forma tal que en el lecho exista la cantidad de sólidos necesaria para garantizar la combustión del combustible.

En pruebas donde la recirculación no era la adecuada; el control de la temperatura del lecho era más difícil y la caída de presión disminuía.

Con el fin de mejorar la recirculación de sólidos se adicionó a la válvula "L" un ducto que le suministró aire en el codo, así se consiguió fluidizar parte de los sólidos estancados y de esta forma mejorar el sistema de recirculación. Sin embargo la formación de conglomerados de partículas provocó que los sólidos no recircularan adecuadamente a través de la válvula "L".

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Con base en los resultados experimentales, se demuestra la factibilidad de quemar combustóleo en un lecho fluidizado circulante.
- Las emisiones de bióxido de azufre disminuyen en función de la cantidad adicionada de carbonato de calcio, obteniéndose experimentalmente una disminución de 1536 ppm a 1109 ppm de SO₂ (43 % de retención de bióxido de azufre) para una relación Ca/S de 4.5.
- Las emisiones de bióxido de azufre de las pruebas experimentales cumplen con la norma vigente (NOM-085-ECOL-1994) para emisiones de SO₂ en zonas críticas.
- Las emisiones de CO resultan ser elevadas, dado que el sistema de recirculación de sólidos no funciona adecuadamente; esto provoca que el tiempo de residencia de los gases y el mezclado del combustible sean insuficientes para completar totalmente la combustión del carbón del combustible.
- Durante la operación del combustor de lecho fluidizado circulante se observaron problemas en el sistema de recirculación de sólidos (válvula "L") que afectaron notablemente su operación.
- Con el fin de mejorar la combustión en el lecho fluidizado circulante, se recomienda analizar y diseñar otros sistemas de recirculación de sólidos, tales como las válvulas no mecánicas "loop seal" y "seal pot", que emplean como medio de recirculación lechos fluidizados burbujeantes.

Una de las principales características de los combustores de lecho fluidizado, es su capacidad para quemar prácticamente cualquier tipo de combustible, por ello se recomienda realizar ensayos con otros combustibles (e incluso mezclas de ellos), de esta forma se podrá tener un conocimiento más profundo acerca del fenómeno de combustión en lecho fluidizado circulante para el caso particular de los combustibles nacionales.

NOMENCLATURA.

A	Area transversal del lecho.	m^2
Ar	Número de Arquímedes $Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2}$.	Adimensional.
C_{Ca}	Concentración de calcio en el aditivo.	kg Ca/kg aditivo
C_S	Concentración de azufre en el combustóleo.	kg S/kg comb
D	Diámetro del lecho.	m
D_B	Diámetro de la burbuja.	m
d_p	Diámetro promedio de la partícula.	m
EA	Exceso de aire.	Adimensional.
$F_{a, b, c}$	Flujos de aire, aditivo y combustóleo respectivamente.	kg/h
f_c	Factor de combustión.	Adimensional.
g	Aceleración de la gravedad.	m/s^2
$h_{i, f}$	Altura inicial y final del tanque diario.	m
L	Altura del lecho.	m
r	Radio del lecho.	m
$r_{F, G}$	Radio de la flama y de la gota respectivamente.	m
$V_{EA, G, GE}$	Volumen del exceso de aire, de los gases de combustión y de los gases estequiométricos respectivamente.	m^3
V_{SO_2, O_2}	Volumen de SO_2 y O_2 respectivamente.	m^3

Letras griegas.

ΔP	Caída de presión a través del lecho fijo.	N/m^2
$\Delta P_{f, mf}$	Caída de presión a través del lecho fluidizado y de mínima fluidización.	N/m^2
ε	Porosidad del lecho.	Adimensional.
ϕ	Esfericidad de la partícula.	Adimensional.
μ_g	Viscosidad del gas.	$kg/m \ s$
v	Velocidad del gas.	m/s
$v_{B, f, l, mf}$	Velocidad promedio de las burbujas, de fluidización, de una burbuja y de mínima fluidización respectivamente.	m/s
$\rho_{a, comb., g, p}$	Densidad del aire, del combustóleo, del gas y de la partícula respectivamente.	kg/m^3

GLOSARIO DE TERMINOS.

1. **Finos:** partículas parcialmente quemadas con diámetros muy pequeños y que pueden ser arrastradas fácilmente por la corriente de gases de combustión.
2. **Fondos IMPEX:** producto derivado de la eliminación de azufre, metales pesados y asfaltenos del crudo; tiene un color entre café oscuro y negro; es quebradizo y su punto de fusión no se encuentra bien definido aunque es bajo; al ser calentado tiende a hincharse y a aglomerarse. Se encuentra constituido principalmente por asfaltenos.
3. **Frente de flama:** pequeña región, dentro de la flama, donde se inicia la reacción de combustión.
4. **Porosidad:** fracción del volumen total del lecho que está ocupada por el gas.
5. **Kerosene:** combustible derivado del petróleo; líquido oleoso de color amarillo claro; se emplea para limpiar y desengrasar y como combustible doméstico para lámparas y estufas.
6. **Velocidad superficial o de fluidización:** velocidad a la cual el aire o los gases de combustión pasan a través del lecho, a la temperatura del mismo y asumiendo que se encuentra vacío.

REFERENCIAS.

1. Basu, P. and Fraser, Scott A., 1991, *Circulating Fluidized Bed Boilers, Design and Operations*, Butterworth-Heinemann, U.S.A.
2. Boynton, Robert S., 1966, *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, Interscience Publishers, U.S.A.
3. Burnside, W., Marskell, W. G. and Miller, J. M., 1956, "The Influence of Superheater Metal Temperature on the Acid Dew-Point of Flue Gases," *J. Inst. Fuel*, 29, 261-9.
4. Cogbill, C. V. and Likens, G. E., 1974, "Acid Precipitation in Northeastern U.S.," *Water Reso. Rese.*, 10, pp. 1133.
5. Davidson, J. F., and Harrison, D., 1963, *Fluidized Particles*, Cambridge University Press.
6. Ehrlich, S., 1975, "A Coal-Fired Fluidized Bed Boiler," *Institute of Fuel Symp. Ser. No. 1*, Vol. 1, pp. C4.
7. Ergun, S., 1952, "Fluid Flow Through Packed Columns," *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, pp. 89-94.
8. Geldart, D. et. al., 1986, *Gas Fluidization Technology*, John Wiley and Sons, Great Britain.
9. Geldart, D., and Abrahamsen, A. R., 1981, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 77 (205)*, 160.
10. Harlow, W. F., 1944, "Causes of High Dew-Point Temperatures in Boiler Flue Gases," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 151, pp 293-298.
11. Holman, J. P., 1966 *Experimental Methods for Engineers*, Mc Graw Hill, U.S.A.
12. López Sánchez, Heriberto, 1995, "Diseño de un Prototipo de Combustor de Lecho Fluidizado Circulante (C.L.F.C.) para Investigación y Desarrollo," tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de la laguna, Torreón Coahuila, México.

13. Macedo Muth, Javier, 1986, *Generalidades sobre Lechos Fluidizados*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Temixco, Morelos.
14. Manabe, S., and Wetherald, R. T., 1967, *J. Atmos. Sci.*, 24, pp. 241.
15. Milán Foressi, Julio J., "Optimación de la Combustión en Calderas Industriales," *DEPTAC-IIIE*.
16. Milán Foressi, Julio J., 1992, *Ensayos de Combustión en Lechos Fluidizados*, Informe IEE 44161, Temixco, Morelos.
17. Rodríguez Cazares, Mario, 1990, "Fluidization and Fluidized Bed Combustion Systems, A Critical Review," Master Science Course, Department of Mechanical and Process Engineering, Chemical Engineering and Fuel Technology, University of Sheffield.
18. Ross, R. D., 1974, *La Industria y la Contaminación del Aire*, Ed. Diana, México.
19. Stewart, P. S. B. and Davidson, J. F., 1967, "Slug Flow in Fluidized Beds," *Powder Technol.*, 1, pp. 61.
20. Wickert, K., 1957, "Chemical Reactions in the Combustion Chamber of a Boiler," *Brennstoff-Wärme-Kraft*, 9, 104-18.

APENDICE A

1.- Cálculos estequiométricos para la combustión del combustóleo.

1.1- Composición.

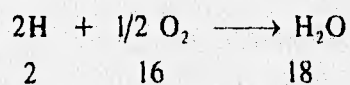
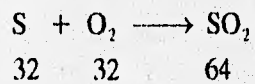
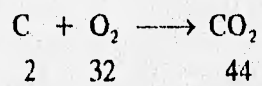
Elemento.	% en peso
Carbono.	85.17
Hidrógeno.	10.51
Azufre.	3.64
Cenizas.	0.07

Poder calorífico superior = 10, 123 kcal/kg

Viscosidad a 80 °C = 0.216 kg/m s

Viscosidad a 85 °C = 0.173 kg/m s

1.2.- Ecuaciones de combustión completa.



1.3.- Requerimientos de oxígeno estequiométrico (base de cálculo 1 kg de combustóleo).

$$\text{Para } \text{CO}_2 \quad 0.8517 \text{ kg de C/kg de comb} \left(\frac{32 \text{ kg O}_2}{12 \text{ kg C}} \right) = 2.2712 \text{ kg O}_2/\text{kg comb.}$$

$$\text{Para } \text{SO}_2 \quad 0.0364 \text{ kg de S/kg de comb} \left(\frac{32 \text{ kg O}_2}{32 \text{ kg S}} \right) = 0.0364 \text{ kg O}_2/\text{kg comb.}$$

$$\text{Para } \text{H}_2\text{O} \quad 0.1051 \text{ kg de H/kg de comb} \left(\frac{16 \text{ kg O}_2}{2 \text{ kg H}} \right) = 0.8408 \text{ kg O}_2/\text{kg comb.}$$

$$\text{O}_2 \text{ estequiométrico} = \underline{\underline{3.1484 \text{ kg O}_2/\text{kg comb.}}}$$

1.4.- Requerimientos de aire estequiométrico.

Teniendo en cuenta que un kg mol de cualquier gas (a 1 atm de presión y 0 °C de temperatura) ocupa un volumen de 22.4 m³, y que 1 m³ de aire contiene prácticamente un 79 % en volumen de nitrógeno y 21 % en volumen de oxígeno, se pueden realizar los siguientes cálculos.

Para 1 m³ de aire se tiene:

$$0.21 \text{ m}^3 \text{ de O}_2 \left(\frac{32 \text{ kg O}_2 \text{ kg mol}}{22.4 \text{ m}^3 \text{ kg mol}} \right) = 0.3 \text{ kg O}_2$$

$$0.79 \text{ m}^3 \text{ de N}_2 \left(\frac{28 \text{ kg N}_2 \text{ kg mol}}{22.4 \text{ m}^3 \text{ kg mol}} \right) = 0.9875 \text{ kg N}_2$$

$$\Sigma = \underline{\underline{1.2875 \text{ kg de aire}}}$$

$$\% O_2 \text{ en peso} = \frac{0.3 \text{ kg } O_2}{1.2875 \text{ kg de aire}} * 100 = 23.32 \%$$

$$\% N_2 \text{ en peso} = 100 - \% O_2 = 100 - 23.32 = 76.68 \%$$

$$\text{Aire estequiométrico} = 3.1484 \text{ kg } O_2/\text{kg comb.} \left(\frac{1 \text{ kg aire}}{0.2332 \text{ kg } O_2} \right)$$

$$\text{Aire estequiométrico} = 13.5124 \text{ kg aire/kg de comb} \quad (10.3640 \text{ kg } N_2 \text{ y } 3.1484 \text{ kg } O_2)$$

1.5.- Peso de los gases de combustión.

$$CO_2 \quad 0.8517 \text{ kg de C/kg de comb} \left(\frac{44 \text{ kg } CO_2}{12 \text{ kg C}} \right) = 3.1229 \text{ kg } CO_2/\text{kg comb.}$$

$$SO_2 \quad 0.0364 \text{ kg de S/kg de comb} \left(\frac{64 \text{ kg } SO_2}{32 \text{ kg S}} \right) = 0.0728 \text{ kg } SO_2/\text{kg comb.}$$

$$H_2O \quad 0.1051 \text{ kg de H/kg de comb} \left(\frac{18 \text{ kg } H_2O}{2 \text{ kg H}} \right) = 0.9459 \text{ kg } H_2O/\text{kg comb.}$$

N_2

$10.3640 \text{ kg } N_2/\text{kg comb}$

$$\Sigma = 14.5056 \text{ kg/kg comb}$$

1.5.1.- Por ciento en peso de los gases de combustión.

<u>Gas</u>	<u>% peso</u>
CO ₂	21.5289
SO ₂	0.5018
H ₂ O	6.5209
N ₂	71.4482
	<hr/>
	$\Sigma = 99.9988$

1.6.- Por ciento en volumen de los gases de combustión (base seca).

$$\text{CO}_2 \quad 3.1229 \text{ kg CO}_2/\text{kg comb.} \left(\frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ kg mol}}{44 \text{ kg CO}_2 \text{ kg mol}} \right) = 1.5898 \text{ m}^3/\text{kg comb.}$$

$$\text{SO}_2 \quad 0.0728 \text{ kg SO}_2/\text{kg comb.} \left(\frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ kg mol}}{64 \text{ kg SO}_2 \text{ kg mol}} \right) = 0.0254 \text{ m}^3/\text{kg comb.}$$

$$\text{N}_2 \quad 10.3640 \text{ kg N}_2/\text{kg comb.} \left(\frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ kg mol}}{28 \text{ kg N}_2 \text{ kg comb.}} \right) = 8.2912 \text{ m}^3/\text{kg comb.}$$

$$\Sigma = 9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb}$$

<u>Gas</u>	<u>% volumen</u>
CO ₂	16.0482
SO ₂	0.2563
N ₂	83.6953
	<hr/>
	$\Sigma = 99.9988$

2.- Relación entre exceso de aire y % O₂ .

Para cualquier combustible:

$$\% EA = (3.762 + f_c) \frac{21 \times \% O_2}{21 - \% O_2} \quad (A.1)$$

Donde

f_c = Factor de combustión.

$$f_c = \frac{\frac{\% C}{12} + \frac{\% S}{32} + \frac{\% N_2}{28}}{\frac{\% C}{12} + \frac{\% S}{32} + \frac{\% H}{4} - \frac{\% O_2}{32}} \quad (A.2)$$

Para el combustóleo:

$$f_c = \frac{\frac{85.17}{12} + \frac{3.64}{32}}{\frac{85.17}{12} + \frac{3.64}{32} + \frac{10.51}{4}} = 0.7329$$

Sustituyendo:

$$\% EA = 94.395 \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \quad (A.3)$$

3.- Normalización de concentraciones a un % O₂ determinado.

El volumen de los gases de combustión (V_G) es la suma del volumen de los gases estequiométricos (V_{GE}) más el volumen del exceso de aire (V_{EA}).

V _{CO₂}	V _{SO₂}	V _{N₂}
-----------------------------	-----------------------------	----------------------------

V_{GE}

V _{O₂}	V _{N₂}
----------------------------	----------------------------

V_{EA}

$$V_G = V_{GE} + V_{EA}$$

Para dos diferentes excesos de aire (EA₁ y EA₂), la concentración de SO₂ será:

Para el exceso de aire EA₁,

$$C_{(SO_2)_1} = \frac{V_{SO_2}}{V_{GE} + V_{EA_1}} \quad (A.4)$$

De manera similar para el exceso de aire EA₂

$$C_{(SO_2)_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{GE} + V_{EA_2}} \quad (A.5)$$

Dividiendo (A.4) entre (A.5) se tiene:

$$\frac{C_{(SO_2)_1}}{C_{(SO_2)_2}} = \frac{V_{GE} + V_{EA_2}}{V_{GE} + V_{EA_1}} \quad (A.6)$$

Para calcular el V_{EA} se cuenta con la siguiente relación entre el % O₂ y el V_{EA}.

$$\% O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{GE} + V_{EA}} \times 100 \quad (A.7)$$

Dado que el volumen de los gases estequiométricos de combustión para el combustóleo (V_{GE}) es de $9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb}$ y $V_{O_2} = 0.21 \times V_{EA}$, la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\% O_2 = \frac{21 V_{EA}}{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} + V_{EA}}$$

Despejando V_{EA} , se obtiene:

$$V_{EA} = \frac{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} \times \% O_2}{21 - \% O_2} \quad (\text{A.8})$$

Considerando como concentración de referencia para la normalización, un 5 % de O_2 (estado 1)*, el volumen del exceso de aire sería:

$$V_{EA_1} = \frac{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} \times 5}{21 - 5} = 3.0957 \text{ m}^3/\text{kg comb}$$

Despejando de la ecuación (A.6) la concentración de SO_2 para el exceso de aire 1, 5 % de O_2 , se llega a la siguiente expresión:

$$C_{(SO_2)_{s,NO_2}} = C_{(SO_2)_{s,NO_2}} \frac{V_{GE} + V_{EA_2}}{V_{GE} + V_{EA_1}} \quad (\text{A.9})$$

Sustituyendo valores en (A.9)

$$C_{(SO_2)_{s,NO_2}} = C_{(SO_2)_{s,NO_2}} \frac{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} + \frac{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} \times \% O_2}{21 - \% O_2}}{9.9064 \text{ m}^3/\text{kg comb.} + 3.0957 \text{ m}^3/\text{kg comb.}}$$

* Nota: 5 % de oxígeno corresponde al porcentaje de oxígeno utilizado en la norma que fija las emisiones máximas permisibles de dióxido de azufre en el país (NOM-085-ECOL-1994).

Rearreglando la ecuación anterior se tiene:

$$C_{(SO_2)_{5\%O_2}} = C_{(SO_2)_{21\%O_2}} \frac{9.9064}{9.9064 + 3.0957} \left(1 + \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \right)$$

Dado que los analizadores de gases expresan las emisiones de SO₂ en partes por millón y que ppm SO₂ = % C_(SO₂) × 10,000, la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\text{ppm SO}_2 (5\% O_2) = \text{ppm SO}_2 (21\% O_2) \times 0.7619 \left(1 + \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \right) \quad (\text{A.10})$$

4.- Porcentaje de azufre retenido.

La cantidad de bióxido de azufre emitido (sin adicionar carbonato de calcio) en un equipo de combustión convencional, con un % O₂ = 5 sería:

$$C_{(SO_2)} = \frac{V_{SO_2}}{V_{GE} + V_{EA}} = \frac{0.0254 \text{ m}^3/\text{kg comb.}}{(9.9064 + 3.0957) \text{ m}^3/\text{kg comb.}} = 0.00195353$$

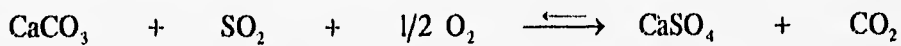
$$\text{ppm de SO}_2 = \% C_{(SO_2)} \times 10,000 = (0.00195353)(100)(10,000) = 1,953.53$$

De lo anterior se tiene:

$$\% \text{ SO}_2 \text{ ret.} = \frac{1,953.53 - \text{ppm SO}_2 (5\% O_2)}{1,953.53} \times 100 \quad (\text{A.11})$$

5.- Relación Ca/S.

La reacción química entre el aditivo (carbonato de calcio) y el bióxido de azufre, es la siguiente:



$$1 \text{ kg mol Ca} = 40 \text{ kg} \quad 1 \text{ kg mol S} = 32 \text{ kg}$$

$$\text{Relación de pesos atómicos } \frac{\text{S}}{\text{Ca}} = \frac{32 \text{ kg S kg mol}}{40 \text{ kg Ca kg mol}} = 0.8 \frac{\text{kg S}}{\text{kg Ca}}$$

$$\frac{\text{Ca}}{\text{S}} = 0.8 \text{ kg S/kg Ca} \left(\frac{F_b \times C_{Ca}}{F_c \times C_s} \right) \quad (\text{A.12})$$

Donde

$$\frac{\text{Ca}}{\text{S}} = \text{Relación Ca/S (adimensional)}$$

$$F_b = \text{Flujo de aditivo (carbonato de calcio) [kg/h]}$$

$$F_c = \text{Flujo de combustible [kg/h]}$$

$$C_{Ca} = \text{Concentración de Ca en el aditivo [kg Ca/kg aditivo]}$$

$$C_s = \text{Concentración de S en el combustible [kg S/kg combustóleo]}$$

El aditivo empleado tiene un 99.7% en peso de carbonato de calcio, por lo que su concentración de Ca es:

$$C_{Ca} = \frac{40 \text{ g Ca}}{99.7 \text{ g CaCO}_3} \times 100 = 40\% \text{ de Ca}$$

6.- Flujo de aire.

El flujo de aire se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$F_a = 13.5124 \text{ kg/kg comb.} \times F_c \left(1 + \frac{\% EA}{100} \right) \quad (\text{A.13})$$

Donde

F_a = Flujo de aire [kg/h]

F_c = Flujo de combustible [kg/h]

EA = Exceso de aire

7.- Velocidad superficial o de fluidización (referida al aire).

Se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$v_f = \frac{F_a}{3,600 \times \rho_a \times A} \quad (\text{A.14})$$

Donde

F_a = Flujo de aire [kg/h]

v_f = Velocidad de fluidización [m/s]

ρ_a = Densidad del aire a la temperatura promedio del lecho [kg/m³]

A = Area transversal del lecho [m²]

Temperatura promedio del lecho = $\frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$ [°C]

$$A = \pi \times r^2 = 3.1416(0.1658 \text{ m})^2 = 0.0863 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$v_f = \frac{F_a}{310.68 \times \rho_a} \quad (\text{A.15})$$

8.- Flujo de combustóleo.

$$F_c = \frac{\Pi \times r^2 (h_i - h_f) \times \rho_{\text{comb.}} \times 60}{\text{minutos operando con combustóleo}} \quad (\text{A.16})$$

Donde

F_c = Flujo de combustóleo [kg comb./h]

r = radio del tanque (0.20 m)

h_i y h_f = Nivel inicial y final del tanque [m]

$\rho_{\text{comb.}}$ = Densidad del combustóleo [kg/m³]

APENDICE B

Válvulas no mecánicas.

Las válvulas no mecánicas son dispositivos empleados para controlar el flujo de partículas sólidas; para su funcionamiento no se requiere de la aplicación de alguna fuerza mecánica externa, sino únicamente la inyección de gas.

Las principales ventajas que ofrecen este tipo de válvulas sobre las válvulas mecánicas son:

- ♦ No hay movimiento de partes mecánicas.
- ♦ Pueden ser construidas fácilmente en tamaños comerciales a partir de materiales comerciales.
- ♦ Su construcción no es costosa.

Existen diversos diseños de válvulas no mecánicas, como se muestra en la figura B.1.

En las válvulas no mecánicas los sólidos se mueven por el aire y su desplazamiento se realiza en forma de ondas. Durante el movimiento de los sólidos una parte de ellos se estanca en el codo (para el caso de las válvulas tipo "L"), pero al incrementarse la velocidad del gas la cantidad de sólidos estancados disminuye; cabe resaltar que aunque la velocidad del gas sea muy alta siempre existirá una pequeña cantidad de sólidos estancados en el codo.

Otro diseño son las válvulas "seal pot" y "loop seal", que están constituidas por lechos fluidizados burbujeantes, como se muestra en la figura B.2.



Figura B.1. Válvulas no mecánicas.

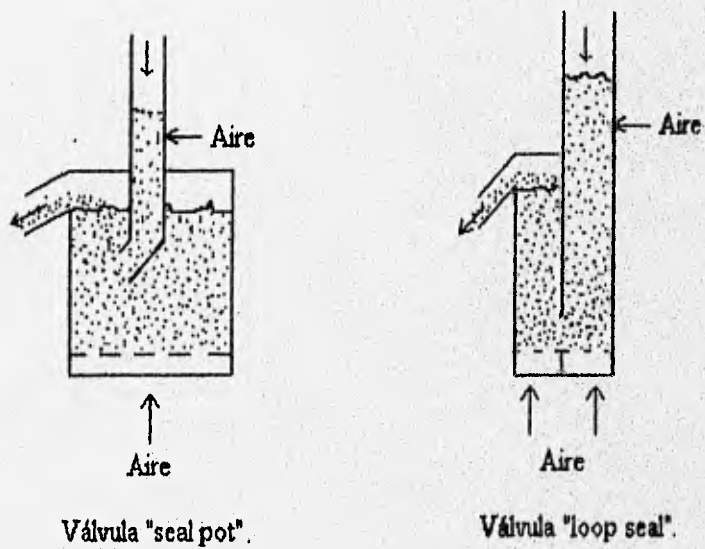


Figura B.2. Válvulas "seal pot" y "loop seal".

A continuación se describen las principales características de las válvulas "seal pot" y "loop seal".

Válvulas "seal pot":

- ◆ Están constituidas por un lecho fluidizado burbujeante que promueve la recirculación de partículas al combustor.
- ◆ El ducto de alimentación tiene una inclinación horizontal para evitar que el flujo de partículas ascendentes altere la dirección de las partículas provenientes del ciclón.

Válvulas "loop seal"

- ◆ Son más pequeñas que las válvulas "seal pot".
- ◆ Están constituidas por dos lechos fluidizados burbujeantes.
- ◆ Las partículas se desplazan horizontalmente, fluyendo de un lecho a otro a través de una pequeña unión.
- ◆ Requieren menos aire de fluidización que las válvulas "seal pot".