



6  
2.05

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ZARAGOZA"**

**ANALISIS FENOMENOLOGICO DE  
REACCIONES EN PROCESOS A ALTA  
TEMPERATURA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A N :**

**FEDERICO GUILLERMO JIMENEZ GONZALEZ  
FRANCISCO MAURICIO MEJIA LIMA  
ROMAN VALERA MOTA**

**MEXICO, D. F.**

**1985**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## INDICE

INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	7
CAPITULO 1	
ASPECTOS GENERALES	9
CAPITULO 2	
FENOMENOLOGIA DE PROCESOS A ALTAS TEMPERATURAS	19
2.1    FENOMENOLOGIA DE REACCIONES A ALTA TEMPERATURA	19
2.1.1    COMBUSTION	19
2.1.2    CALCINACION	23
2.1.3    REACCIONES SOLIDO-SOLIDO Y SOLIDO-GAS	25
2.2    PROCESOS FENOMENOLOGICOS DE REACCIONES A ALTAS TEMPERATURAS	26
2.2.1    CAMBIO DE FASE LIQUIDO-GAS Y SOLIDO-GAS	27
2.2.2    TRANSFORMACION DE SOLIDOS	36
2.2.3    FENOMENOLOGIA DE FLAMAS	47
2.2.4    GENERACION DE RADIACION	54
2.2.5    TRANSFERENCIA DE ENERGIA	56
2.2.6    PERFILES DE TEMPERATURA	63

## INDICE

4.1.1	MANEJO DE MATERIALES LIQUIDOS	135
4.1.2	MANEJO DE SUSPENSIONES	136
4.1.3	MANEJO DE MATERIALES GASEOSOS	138
4.1.4	MANEJO DE MATERIALES SOLIDOS	143
4.2	CONTACTO ENTRE FASES	147
4.2.1	CONTACTO ENTRE FASES GAS-SOLIDO	147
4.2.2	CONTACTO ENTRE FASES SOLIDO-SOLIDO	153
4.3	MEZCLA DE MATERIALES	154
4.3.1	MEZCLADO GAS-GAS	156
4.3.2	MEZCLADO SOLIDO-SOLIDO	158
4.3.3	MEZCLADO SOLIDO-GAS	161
4.4	SEPARACION DE MATERIALES	161
4.4.1	SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE DENSIDADES	163
4.4.2	SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE TAMAÑO DE PARTICULA	165
4.5	TRANSFERENCIA DE ENERGIA GLOBAL	168
4.5.1	MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION	168

## INDICE

4.1.1	MANEJO DE MATERIALES LIQUIDOS	135
4.1.2	MANEJO DE SUSPENSIONES	136
4.1.3	MANEJO DE MATERIALES GASEOSOS	138
4.1.4	MANEJO DE MATERIALES SOLIDOS	143
4.2	CONTACTO ENTRE FASES	147
4.2.1	CONTACTO ENTRE FASES GAS-SOLIDO	147
4.2.2	CONTACTO ENTRE FASES SOLIDO-SOLIDO	153
4.3	MEZCLA DE MATERIALES	154
4.3.1	MEZCLADO GAS-GAS	156
4.3.2	MEZCLADO SOLIDO-SOLIDO	158
4.3.3	MEZCLADO SOLIDO-GAS	161
4.4	SEPARACION DE MATERIALES	161
4.4.1	SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE <u>DENSIDADES</u>	163
4.4.2	SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE TAMAÑO DE PARTICULA	165
4.5	TRANSFERENCIA DE ENERGIA GLOBAL	168
4.5.1	MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION	168

## INDICE

4.5.2	MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION	172
4.5.3	MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION	172
4.6	GENERACION DE ENERGIA Y REACCION	175
4.6.1	GENERACION DE ENERGIA	175
4.6.2	REACCION	179
4.7	FENOMENOLOGIA DE QUEMADORES	182
4.7.1	MANEJO DE MATERIALES	182
4.7.2	CONTACTO ENTRE FASES EN QUEMADORES	183
4.7.3	MEZCLADO	184
4.7.4	TRANSFERENCIA DE ENERGIA	189

## CAPITULO 5

	VARIABLES Y PARAMETROS CRITICOS DE OPERACIONES DE HORNOS	195
5.1	INCRUSTACION DE SOLIDOS EN PAREDES	197
5.2	PERDIDAS DE ENERGIA POR RADIACION	198
5.3	TAPONAMIENTO DE CONDUCTOS	200
5.4	EROSION POR CONVECCION DE FLUIDOS	205
5.5	TEMPERATURA MAXIMA DE CALENTAMIENTO DE PARTES METALICAS	206

## INDICE

5.6	TEMPERATURA MAXIMA DE LA CAMARA DE COMBUSTION	207
5.7	MAXIMA CAIDA DE PRESION	208
5.8	MAXIMA Y MINIMA MASA VELOCIDAD	208
5.9	TEMPERATURA DE PROCESO	209
5.10	TAMAÑO DE PARTICULA	210
5.11	DISTRIBUCION DE QUEMADORES	212
CAPITULO 6		
	CRITERIOS DE SELECCION Y DISEÑO PARA HORNO DE REACCION	216
6.1	CRITERIOS DE SELECCION PARA HORNO DE REACCION	217
6.1.1	ESTADO FISICO DEL MATERIAL A PROCESAR	217
6.1.2	TIPO DE CALENTAMIENTO	219
6.1.3	TAMAÑO DE PARTICULAS DE MATERIALES SOLIDOS	220
6.1.4	CAMBIO DE TAMAÑO DE PARTICULA	221
6.1.5	MANEJO DE SUSPENSIONES	223
6.1.6	MANEJO DE FLUIDOS	223
6.1.7	CONTACTO ENTRE FASES	223
6.1.8	FLEXIBILIDAD EN LA OPERACION DEL HORNO	224

## INDICE

6.1.9	FACILIDAD DE MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO DE PARTES	225
6.1.10	COSTO DEL EQUIPO	226
6.2	CRITERIOS DE DISEÑO DE HORNOS	227
6.2.1	CRITERIOS GENERALES	227
6.2.2	CRITERIOS ESPECIFICOS	232

## CAPITULO 7

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	235
--	--------------------------------	-----

## APENDICE A

	TENDENCIAS EN INVESTIGACION Y DESARROLLO DE EQUIPO DE PROCESO A ALTAS TEMPERATURAS Y SUS APLICACIONES INDUSTRIALES	240
	BIBLIOGRAFIA	261

## INDICE DE TABLAS

NO. DE T.

1.1	RELACION OPERACIONES-EQUIPOS	12
1.2	ETAPAS FENOMENOLOGICAS GLOBALES DE LOS EQUIPOS (HORNO), TRATADOS	13
1.3	ETAPAS FENOMENOLOGICAS LOCALES DE LOS PROCESOS MANEJADOS	14
1.4	VARIABLES Y PARAMETROS CRITICOS EN LOS EQUIPOS TRATADOS	15
1.5	PRINCIPALES CRITERIOS DE SELECCION DE LOS EQUIPOS A ALTA TEMPERATURA	16
1.6	PRINCIPALES CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS EQUIPOS A ALTA TEMPERATURA	17
2.1	ESQUEMA DE REACCION EMPLEADO PARA LA OXIDACION DEL METANO	21
2.2	FENOMENOLOGIA DE PROCESOS A ALTA TEMPERATURA	28
3.1	ZONAS COMUNES A LOS EQUIPOS EN QUE SE LLEVAN A CABO REACCIONES A ALTA TEMPERATURA	80
4.1	ANGULOS RECOMENDADOS Y TOLERADOS PARA LA FABRICACION DE BOQUILLAS PARA QUEMADORES DE DUCTOS - CONCENTRICOS	194
5.1	PRINCIPALES VARIABLES Y PARAMETROS CRITICOS EN LAS OPERACIONES DE HORNO	196
5.2	TABLA COMPARATIVA DE EFICIENCIA DE UN HORNO DE ACUERDO AL ARREGLO DE SUS QUEMADORES	214
6.1	CRITERIOS DE SELECCION DE EQUIPO A ALTA TEMPERATURA	218

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.

2.1	ATOMIZACION DE UN LIQUIDO COMBUSTIBLE	30
2.2	VAPORIZACION DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS DURANTE LA COMBUSTION	32
2.3	VAPORIZACION DE LIQUIDOS EN SUSPENSION LIQUIDO-SOLIDO	34
2.4	REDUCCION DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS	42
2.5	FRACTURA DE PARTICULAS	44
2.6	EVOLUCION DE POROS EN EL INTERIOR DE UNA PARTICULA	46
2.7	PERFILES DE VELOCIDAD CONSTANTE, VELOCIDAD AXIAL MEDIA/VELOCIDAD AXIAL A LA SALIDA DEL QUEMADOR	52
2.8	EFFECTO DEL PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE EN LA LONGITUD DE UNA FLAMA	53
2.9	PERFIL DE TEMPERATURA EN UNA PARTICULA SOLIDA	59
2.10	TRAYECTORIA DE LA RADIACION (ONDAS ELECTROMAGNETICAS), DE UN SISTEMA DE PARTICULAS	62
2.11	ZONAS DE TEMPERATURA EXISTENTES EN UNA FLAMA CONVENCIONAL	65
2.12	POSIBLES PERFILES DE TEMPERATURA QUE PUEDEN PRESENTARSE EN UNA INTERFASE SOLIDO-GAS	68
2.13	PERFILES DE TEMPERATURA EN LA PARTICULA EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE PROCESO CON SOLIDO	71

## INDICE DE FIGURAS

## NO. DE F.

2.14	TEMPERATURAS PROMEDIO DE PARTICULAS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE UN PROCESO A ALTA TEMPERATURA	72
2.15	TRANSFERENCIA DE MASA SOLIDO-GAS	75
3.1	PATRON DE FLUJO DE MATERIALES I	83
3.2	PATRON DE FLUJO DE MATERIALES II	85
3.3	PATRON DE FLUJO DE MATERIALES III	86
3.4	PATRON DE FLUJO DE MATERIALES IV	88
3.5	ZONAS QUE SE PRESENTAN EN UN HORNO CONVENCIONAL - DE ACUERDO AL PATRON DE FLUJO I	89
3.6	DIVERSAS FORMAS GEOMETRICAS DE HORNO CONVENCIONALES	91
3.7	COMPONENTES DE UN HORNO CONVENCIONAL	92
3.8	DIVERSAS COLOCACIONES DE QUEMADORES EN HORNO CONVENCIONALES	93
3.9	DISPOSICION DE TUBOS EN HORNO CONVENCIONALES	94
3.10	DIVERSOS ARREGLOS DE HORNO CONVENCIONALES	97
3.11	HORNO TUBULAR CON CALENTAMIENTO DIRECTO	99
3.12	HORNO TUBULAR CON CALENTAMIENTO INDIRECTO	100

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.

3.13	REACTOR TUBULAR CON ENTRADA DE COMBUSTIBLE TANGENCIAL Y ZONA DE APAGADO	101
3.14	HORNO ROTATORIO TIPICO	103
3.15	TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS	104
3.16	HORNO ROTATORIO CON TRES DIFERENTES DIAMETROS	107
3.17	HORNO DE LECHO FLUIDIZADO DE CALENTAMIENTO DIRECTO	111
3.18	ENTRADAS DE GAS EN HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO	113
3.19	DISTRIBUIDORES DE GAS, PARA GASES CON SOLIDOS EN HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO	114
3.20	PATRON DE FLUJO DE PREMEZCLADO DONDE LAS ZONAS DE MEZCLADO Y REACCION SE SUCEDEN SEPARADAMENTE	117
3.21	QUEMADOR DE MANGA PARALELA	119
3.22	QUEMADOR DE ENTRADA FLAMEADA	120
3.23	QUEMADOR TIPO VENTURI DE ENTRADA UNIFORME	121
3.24	QUEMADOR DE TUBOS CONCENTRICOS CON CORRIENTE MODERADORA DE TEMPERATURA	122
3.25	QUEMADOR DE MEZCLADO PREVIO UTILIZADO EN LECHOS FLUIDIZADOS CON DOS ARREGLOS DE DESCARGA	123

## INDICE DE FIGURAS

## NO. DE F.

3.26	PATRON DE FLUJO DE POSTMEZCLADO DONDE LAS ZONAS - DE MEZCLADO Y REACCION SE SUCEDEN EN EL MISMO SITIO	125
3.27	FORMAS DE REALIZAR EL MEZCLADO DE REACTIVOS EN - QUEMADORES QUE MANEJAN COMBUSTIBLE SOLIDO	126
3.28	QUEMADOR QUE MANEJA COMBUSTIBLE LIQUIDO O GASEOSO CON MEZCLADO DE LOS REACTIVOS FUERA DEL EQUIPO	128
3.29	QUEMADOR CONVENCIONAL CON FLUJO DE AIRE FORZADO	129
3.30	QUEMADOR TIPO RECUPERATIVO	132
3.31	QUEMADOR DE ATOMIZACION CON AIRE A BAJA PRESION	133
4.1	EFFECTO DE CONSIDERAR LA INCIDENCIA DE UNA CORRIENTE ANULAR DE AIRE SOBRE UNA ALIMENTACION CON SOLIDOS EN SUSPENSION	137
4.2	ENTRADA DE REACTIVOS, CON OPTIMIZACION EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA GENERADA EN UN EQUIPO	139
4.3	UTILIZACION DE UNA CORRIENTE GASEOSA COMO SERVICIO DENTRO DE UN HORNO ROTATORIO	141
4.4	MOVIMIENTO QUE PRESENTAN LAS CORRIENTES EFLUENTES DE QUEMADORES TIPO JET DE UN HORNO	142
4.5	DESPLAZAMIENTO DE MATERIALES DENTRO DE UN HORNO - DE PARED CIRCULAR INCLINADO CON ROTACION	146
4.6	CONTACTO ENTRE FASES SOLIDA Y GASEOSA EN UN HORNO VERTICAL TIPO ROTATORIO	149

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.

4.7	CONTACTO ENTRE LA FASE GASEOSA Y LA SOLIDA EN UN HORNO VERTICAL DE TIPO LECHO FLUIDIZADO	152
4.8	FLUJO DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA ENTRE FASES SOLIDAS POR EL MECANISMO DE CONDUCCION EN UN HORNO ROTATORIO	155
4.9	PATRONES DE FLUJO EN LOS PUNTOS DE ALIMENTACION TANGENCIAL	157
4.10	MEZCLADO DE DOS GASES POR ALIMENTACION DE UNO DE ELLOS EN FLUJO CRUZADO	159
4.11	MEZCLADO DE SOLIDOS EN PROCESOS A ALTAS TEMPERATURAS	160
4.12	SISTEMA QUE LOGRA QUE LOS GASES AL SALIR DE UN LECHO FLUIDIZADO FORMEN UN VORTICE	162
4.13	SISTEMA DE SEPARACION DE SOLIDOS CONTENIDOS EN GASES	164
4.14	SISTEMA DE SEPARACION DE SOLIDOS POR EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTICULA EN LECHOS FLUIDIZADOS	166
4.15	SEPARACION DE SOLIDOS DE ACUERDO A SU TAMAÑO DE PARTICULA	167
4.16	DIVISION DE HORNOS DE ACUERDO A LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA PREDOMINANTE	169
4.17	PATRON DE FLUJO DE CALOR POR EL MECANISMO DE CONDUCCION EN UN HORNO TIPO CONVENCIONAL	171

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.		
4.18	PATRON DE FLUJO DE CALOR DE ACUERDO AL MECANISMO DE CONVECCION EN UN HORNO DE TIPO LECHO FLUIDIZADO	173
4.19	PATRON DE FLUJO DE CALOR DE ACUERDO AL MECANISMO DE RADIACION EN LA ZONA DE COMBUSTION DE UN HORNO ROTATORIO	174
4.20	EFFECTO DEL AUMENTO DE LA ZONA DE RADIACION POR AUMENTO EN EL TAMAÑO DE LA FLAMA	176
4.21	PERFILES DE TEMPERATURA EN HORNOS CILINDRICOS	178
4.22	TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS DE ACUERDO A LA FORMA DE GENERACION DE ENERGIA	180
4.23	DIFERENTES TIPOS DE MEZCLADO EN QUEMADORES	185
4.24	ZONA DE MEZCLADO DE UN QUEMADOR DE POSTMEZCLADO	188
4.25	MEZCLADO EN QUEMADORES QUE UTILIZAN COMBUSTIBLE SOLIDO	190
4.26	POSICION RECOMENDABLE DE BOQUILLAS PARA EVITAR DAÑOS A LAS PARTES EXPUESTAS DEL QUEMADOR	192
5.1	CAMBIO EN EL PERFIL DE TEMPERTURA OCASIONADO POR EL INCRUSTAMIENTO EN UN HORNO A ALTA TEMPERATURA	199
5.2	REPRESENTACION CUALITATIVA DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGIA CALORIFICA POR UN PROCESO, CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA	201
5.3	TAPONAMIENTO PROGRESIVO DE DUCTOS POR INCRUSTACIONES DE IMPUREZAS CONTENIDAS EN LOS FLUIDOS DE PROCESO	203

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.		
5.4	TAPONAMIENTO DE DUCTOS DE QUEMADORES EN LECHO - FLUIDIZADO INEFICIENTE	204
5.5	EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA DE LA CLORACION DE TITANIO	211
5.6	DIFERENTES ARREGLOS DE QUEMADORES EN UN HORNO	213
5.7	DISPOSICION DE LOS QUEMADORES EN UN HORNO CONVEN- CIONAL DE ACUERDO A LA TABLA 6.2	215
A.1	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE HORNOS AL TRATAMIENTO DE MINERALES	244
A.2	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE HORNOS AL TRATAMIENTO DE METALES	245
A.3	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE HORNOS EN EL TRATAMIENTO DE PETROLEO	246
A.4	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE HORNOS EN EL TRATAMIENTO DE CEMENTO	247
A.5	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DEL DISEÑO Y CARACTERISTICAS DE EQUIPO	248
A.6	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE HORNOS EN LA MANUFACTURA DE PRODUCTOS INDUS- TRIALES	250
A.7	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION DE LOS HORNOS A LA OPERACION DE LECHO FLUIDIZADO	252
A.8	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LAS APLICACIO- NES DE LOS QUEMADORES EN EL TRATAMIENTO Y MANU- FACTURA DE MINERALES INDUSTRIALES	253

## INDICE DE FIGURAS

NO. DE F.

A.9	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS APLICACIONES DE LOS QUEMADORES EN EL TRATAMIENTO Y MANUFACTURA DE METALES INDUSTRIALES	254
A.10	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS APLICACIONES DE LOS QUEMADORES EN LA INDUSTRIA DEL PETROLEO	255
A.11	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL DISEÑO Y LAS CARACTERISTICAS DE QUEMADORES	256
A.12	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS APLICACIONES DE QUEMADORES EN LA OBTENCION DE PRODUCTOS INDUSTRIALES	257
A.13	TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA APLICACION DE QUEMADORES EN OPERACION EN LECHO FLUIDIZADO.	259

D

## INTRODUCCION

El estudio de los procesos químicos que ocurren a alta temperatura es de interés en la industria química de proceso por varias razones importantes, entre las que se encuentran las siguientes:

- Las tendencias tecnológicas de los últimos años señalan hacia el desarrollo de procesos que consuman menos energía por unidad de producto producido y hacia la adaptación de los procesos ya existentes en el mismo sentido.

- Los resultados de las tendencias antes señaladas se han hecho notar en los países industrializados dando lugar a un menor consumo de energía per cápita ocasionado, en parte, por la introducción y adaptación de nuevas tecnologías en las áreas relacionadas con alto consumo de energía.
- A pesar de que la situación actual del mercado internacional de energía, indica que el costo de la misma no es, por el momento, un factor crítico en la estructura de costos de producción, se espera que en un futuro cercano, con la reactivación de la economía a nivel mundial y particularmente a nivel nacional, el aprovechamiento óptimo de los recursos energéticos seguirá siendo un aspecto importante en el desarrollo y adaptación de procesos industriales.

El desarrollo y la adaptación de procesos con menor consumo de energía ha dado lugar a la investigación y desarrollo en diversas áreas entre las cuales se cuentan las siguientes:

- Síntesis de Procesos, particularmente en tres áreas:
  - A. Síntesis de rutas de reacción en donde el interés se ha centrado en la determinación de rutas de reacción para la obtención de productos específicos bajo materias primas y recursos energéticos limitados.
  - B. Síntesis de redes de recuperación de calor en donde el principal interés es el desarrollo de sistemas de intercambio de calor con utilización óptima de energía y/o mínimo costo de equipo.

### C. Síntesis de secuencias de separación con integración de energía.

- Minimización de pérdidas de energía. En este rubro, el interés se ha dirigido al mejoramiento de los sistemas de recuperación de calor de los procesos y al mejoramiento de los sistemas de generación de energía que utilizan combustibles fósiles y carbón principalmente.
- Maximización de la utilización de energía. En este caso la investigación y desarrollo se ha dirigido a detectar y estudiar los procesos o partes de los procesos que tienen el mayor consumo de energía y a partir de su conocimiento, establecer cambios en las condiciones del mismo que disminuyan el consumo de energía en la producción de productos y/o servicios específicos. En este punto en particular, se han logrado no solo cambios substanciales en las condiciones de proceso sino también en la concepción de los equipos principales y periféricos.

La minimización de pérdidas de calor y la maximización de la utilización de energía son aspectos muy relevantes en procesos a altas temperaturas por la naturaleza de los fenómenos que en ellos ocurren y de allí, el interés principal para desarrollar el trabajo presente.

Por otra parte, el área de procesos a altas temperaturas es extensa y compleja tanto desde el punto de vista fenomenológico como en los aspectos relacionados con métodos de análisis y diseño de equipos; aunado a lo anterior, se cuenta en la actualidad con una cantidad muy limitada de modelos matemáticos que son utilizados principalmente como base de los algoritmos de diseño de

equipo de proceso a altas temperaturas. Es opinión de los autores de este trabajo que tal limitación es debida, en gran parte, a la cantidad y complejidad de los fenómenos que ocurren en tales procesos, tanto desde el punto de vista local como a nivel global o en todo un equipo.

Por lo anteriormente expuesto, se consideró conveniente enfocar este trabajo a la fenomenología de los procesos a alta temperatura, tanto desde el punto de vista local como a nivel global. Se espera que, con las limitaciones que se tienen, este estudio contribuya al mejor entendimiento de los procesos a alta temperatura y a apoyar el desarrollo de modelos cuantitativos que mejoren y enriquezcan los ya existentes.

El trabajo está estructurado de la forma siguiente:

En el capítulo 1 se presenta un marco de referencia general sobre los tópicos que se desarrollan a lo largo del trabajo, justificando la estructura del mismo.

En el capítulo 2 se presentan los principales aspectos fenomenológicos a nivel local que se llevan a cabo en los procesos a alta temperatura.

En el capítulo 3 se hace una descripción de los principales equipos de proceso a alta temperatura en la industria química de proceso; los aspectos fenomenológicos de tales procesos a nivel del equipo son discutidos en el capítulo

El capítulo 5 presenta los aspectos críticos más importantes detectados en los procesos a alta temperatura y que deben ser tomados en cuenta en el diseño de equipo y de proceso.

En el capítulo 6 se presentan los principales criterios de selección y diseño para reactores a alta temperatura.

En el capítulo 7, se presentan las conclusiones de este trabajo y recomendaciones para futuros estudios.

Finalmente en el apéndice A se aboca al análisis global de las tendencias en la investigación y desarrollo de los equipos de proceso a alta temperatura -- con base en la clasificación de las referencias detectadas en fuentes primarias.

## OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- 1º Efectuar un análisis global de las principales tendencias en investigación y desarrollo de los procesos a alta temperatura en la industria química de proceso en los últimos años.
- 2º Efectuar un análisis global de los principales aspectos fenomenológicos a nivel local de los procesos de calcinación, combustión y reacciones sólido-sólido y sólido-gas a alta temperatura.
- 3º Describir de manera global los principales equipos en los que se llevan a cabo las operaciones de calcinación, combustión y reacciones sólido-sólido y sólido-gas a alta temperatura.
- 4º Efectuar un análisis global de los principales aspectos fenomenológicos a nivel equipo global de los procesos de calcinación, combustión y reacciones sólido-sólido y sólido-gas a alta temperatura.

## CAPITULO I

### ASPECTOS GENERALES

Los procesos a alta temperatura en la industria química de proceso involucran, en la mayoría de los casos, reacciones químicas que pueden ser catalíticas ó no catalíticas, homogéneas ó heterogéneas y exotérmicas ó endotérmicas. El caso de procesos con reacciones catalíticas heterogéneas, ha sido objeto de estudio y análisis en gran cantidad en los últimos cuarenta años, tanto a nivel general como específico por la comunidad de investigación básica y aplicada a nivel mundial. El caso de los procesos a alta temperatura que involucran reacciones no catalíticas, tanto homogéneas como heterogéneas, también ha sido objeto de estudios, aunque no ha alcanzado el estatus del primer caso

en cuanto a entendimiento y manejo cuantitativo de modelos se refiere. Lo anterior se debe a múltiples factores entre los cuales se cuentan la complejidad de los procesos y el costo del equipo y de los programas de investigación y desarrollo entre otros.

La clasificación de los procesos incluidos en este estudio en calcinación, combustión y reacciones sólido-sólido y sólido-gas se determinó con base en la estructura detectada en la búsqueda preliminar de información en fuentes primarias.

La característica principal de las operaciones antes señaladas es la de llevarse a cabo significativamente a partir de una temperatura mínima determinada por las propiedades termodinámicas y cinéticas del proceso. Las condiciones más adecuadas de proceso son determinadas con base en el servicio o producto que se desee obtener con el mismo. Por ejemplo, la combustión de un gas se puede inducir con una flama simple y se puede sustentar con temperaturas bajas, como las que se alcanzan en un quemador doméstico, es obvio que el servicio que se puede proporcionar con una combustión de este tipo es muy limitado y los productos de combustión no son 100% los de la combustión total; de este ejemplo se desprende que las condiciones de operación se pueden modificar tanto como sea necesario o posible para satisfacer servicios más exigentes como es el llevar la piedra caliza (básicamente carbonato de calcio), a su temperatura de calcinación (entre 825-925°C a 1 atm. de presión (56)). A lo largo de este trabajo, se entenderá que las operaciones de calcinación y combustión se llevan a cabo a las temperaturas típicas de las mismas en la industria química de proceso y las reacciones sólido-sólido son aquellas que

ocurren a temperaturas mayores de 600°C.

Aunque las operaciones antes señaladas pueden describirse de manera simple - con base en sus aspectos más elementales, éstas se llevan a cabo a través de un buen número de fenómenos que ocurren en forma secuencial y/o en forma simultánea; de estos fenómenos, algunos están asociados al proceso en forma local y otros están asociados a las características del equipo específico en donde se lleva a cabo la operación.

Adicionalmente, existen algunos fenómenos que son comunes a las operaciones - en cuestión y otros que son específicos en uno de ellos. En forma similar - existen equipos en los cuales se pueden llevar a cabo una, ó varias de las operaciones antes mencionadas y además, existen equipos diseñados únicamente - para un solo tipo de operación.

Con base en el análisis preliminar de información, mostrado en el apéndice A, se consideró conveniente enfocar el presente trabajo hacia tres tipos de equipos básicos, estos son: Hornos comunes (llamados en este trabajo convencionales), Hornos rotatorios y Hornos de lecho fluidizado. Además, se consideró - conveniente tratar el renglón de quemadores en forma adicional a los equipos principales por ser éstos equipos periféricos de vital importancia en los procesos a altas temperaturas.

En la tabla 1.1 se presenta la relación de operaciones-equipos que se manejan en este trabajo; se considera que la gran mayoría de los casos de importancia industrial quedan incluidos en este esquema.

TABLA 1.1  
RELACION OPERACIONES-EQUIPOS TRATADOS EN ESTE TRABAJO

EQUIPO	HORNOS CONVENCIONALES	HORNOS ROTATORIOS	H. DE LECHO FLUIDIZADO
OPERACION			
COMBUSTION	*	*	*
CALCINACION	-	*	*
REACCIONES SOLIDO-SOLIDO	-	*	-
REACCIONES SOLIDO-GAS	-	*	*

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

La fenomenología a nivel equipo que se incluye, se presenta en la tabla 1.2 y la fenomenología local se describe en la tabla 1.3. Los fenómenos manejados son los que se consideran que tienen mayor relevancia por lo que la descripción de cada uno de ellos es de primera importancia.

Con relación a las variables y parámetros críticos de los procesos a alta temperatura que se incluyen en este trabajo, los rubros principales se presentan en la tabla 1.4. Finalmente en las tablas 1.5 y 1.6 se presentan algunos criterios globales que se deben tomar en cuenta para la selección y diseño de

equipos a alta temperatura y que fueron tomados en cuenta en el presente estudio.

TABLA 1.2  
ETAPAS FENOMENOLOGICAS GLOBALES DE LOS EQUIPOS  
(HORNO) TRATADOS EN ESTE TRABAJO

EQUIPO(HORNO)	CONVENCIONAL	ROTATORIO	LECHO FLUIDIZADO
ETAPA FENOMENOLOGICA			
MANEJO DE MATERIALES	*	*	*
CONTACTO ENTRE FASES	-	*	*
MEZCLADO DE MATERIALES	-	*	*
SEPARACION DE MATERIALES	-	*	*
TRANSFERENCIA DE ENERGIA	*	*	*
GENERACION DE ENERGIA Y REACCION	*	*	*

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

TABLA 1.3  
ETAPAS FENOMENOLOGICAS LOCALES  
DE LOS PROCESOS MANEJADOS EN ESTE TRABAJO

ETAPA FENOMENOLOGICA	OPERACION	COMBUSTION	CALCINACION	REACCIONES	
				SOLIDO-SOLIDO	SOL.-GAS
CAMBIO DE FASE LIQUIDO- GAS Y SOLIDO-GAS	*	*	*	*	*
TRANSFORMACION DE SOLIDOS	*	*	*	*	*
FENOMENOLOGIA DE FLAMAS	*	-	-	-	-
GENERACION DE RADIACION	*	*	*	*	*
TRANSFERENCIA DE ENERGIA	*	*	*	*	*
PERFILES DE TEMPERATURA	*	*	*	*	*
TRANSFERENCIA DE MASA	*	*	*	*	*

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

TABLA 1.4  
 VARIABLES Y PARAMETROS CRITICOS  
 EN LOS EQUIPOS TRATADOS EN ESTE TRABAJO

EQUIPO (HORNO)	CONVENCIONAL	ROTATORIO	LECHO FLUIDIZADO
VARIABLES O PARAMETROS CRITICOS			
INCRUSTACIONES	-	*	*
PERDIDAS DE ENERGIA	*	*	*
TAPONAMIENTO DE DUCTOS	*	-	*
EROSION	*	-	*
TEMPERATURA MAXIMA DE PARTES METALICAS Y ZONA DE COMBUSTION	*	*	*
MAXIMA CAIDA DE PRESION	*	-	*
MAXIMA Y MINIMA VELOCIDADES DE MASA	*	*	*
TEMPERATURA DE PROCESO	*	*	*
TAMAÑO DE PARTICULA	-	*	*
DISTRIBUCION DE QUEMADORES	*	*	-

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

TABLA 1.5  
 PRINCIPALES CRITERIOS DE SELECCION  
 DE LOS EQUIPOS A ALTA TEMPERATURA

EQUIPO (HORNO)	CONVENCIONAL	ROTATORIO	LECHO FLUIDIZADO
CRITERIO DE SELECCION			
ESTADO FISICO DEL MATERIAL	L G SUSP	S SUSP	S SUSP
TIPO DE CALENTAMIENTO	INDIRECTO	DIRECTO INDIRECTO	DIRECTO INDIRECTO
CONTACTO ENTRE FASES	-	SATISFAC	EXCELENTE
FLEXIBILIDAD DE OPERACION	SATISFAC	SATISFAC	EXCELENTE
MANTENIMIENTO	PERIODICO	NO PERIOD	NO PERIOD
REEMPLAZO DE PARTES	SENCILLO	DIFICIL	SENCILLO
COSTO DEL EQUIPO	INTERMEDIO	MAYOR	MENOR

L: LIQUIDO, G: GAS, S: SOLIDO, SUSP: SUSPENSION

TABLA 1.6  
 PRINCIPALES CRITERIOS DE DISEÑO  
 DE LOS EQUIPOS A ALTA TEMPERATURA

EQUIPO (HORNO)	CONVENCIONAL	ROTATORIO	LECHO FLUIDIZADO
CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO			
MAXIMA TEMPERATURA EN EL HORNO Y FORMA DE CALENTAMIENTO	*	*	*
CAIDA DE PRESION	*	*	*
EQUIPOS PERIFERICOS REQUERIDOS (1)	*	*	*
TIEMPO DE RESIDENCIA Y MASA DE MATERIAL A PROCESAR	*	*	*

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

(1) DISTRIBUIDOR DE GASES, SISTEMA DE CONTROL, SISTE-  
MA DE ROTACION, ETC.

## CAPITULO 2

### FENOMENOLOGIA DE PROCESOS A ALTAS TEMPERATURAS

La fenomenología de reacciones a altas temperaturas está constituida por una gran variedad de procesos individuales, que ocurren en forma simultánea y/o secuencial durante la reacción. Algunos de estos procesos presentan características comunes en los cuatro tipos de reacciones que se consideran en este trabajo (combustión, calcinación y reacciones sólido-sólido y sólido-gas), y en algunos son característicos de un solo tipo de reacciones.

Antes de analizar los fenómenos asociados a la etapa química, se presenta una discusión sobre las reacciones en cuestión.

## 2.1 FENOMENOLOGIA DE REACCIONES A ALTA TEMPERATURA

### 2.1.1 COMBUSTION

Las reacciones de combustión son aquellas en las que reacciona un combustible en fase vapor con oxígeno para producir especies gaseosas de oxidación y desprendiendo energía en forma de calor. La reacción química general de oxidación es:

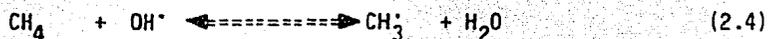
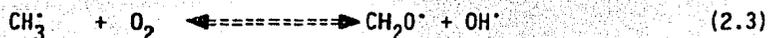
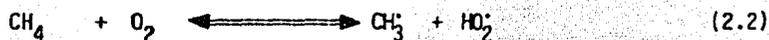


La combustión se presenta siempre entre el combustible en fase gaseosa y el oxígeno, independientemente de la fase en que se presenta inicialmente el combustible usado; en los casos de combustibles líquidos y sólidos, éstos pasan a fase gaseosa por procesos de vaporización y/o sublimación respectivamente.

La combustión se inicia a una temperatura mínima necesaria denominada temperatura de ignición a la cual la mezcla gaseosa, combustible-oxígeno, alcanza el nivel energético mínimo para la reacción.

La combustión como reacción es un proceso muy complejo constituida por un gran número de reacciones, que ocurren en forma consecutiva y paralela.

Se ha establecido (20), que en gran número de reacciones de combustión, éstas se inician con etapas que dan lugar a la formación de radicales libres. Por ejemplo, para la combustión del metano, se ha encontrado que la reacción se inicia con la formación de radicales  $\text{OH}^\cdot$  de acuerdo con el siguiente esquema:



⋮

El esquema de las reacciones que se han detectado en la combustión del metano, se presenta en la tabla 2.1

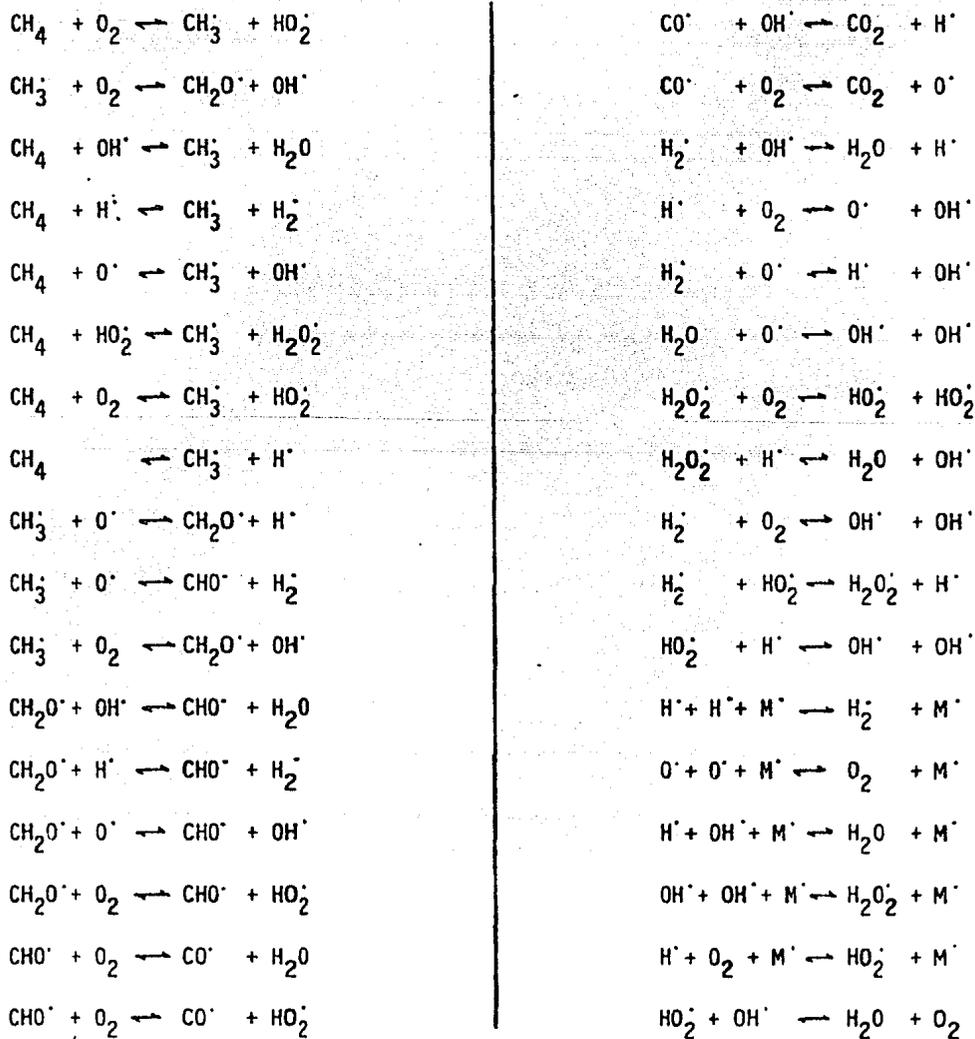
Los radicales que se forman al inicio de la reacción, se multiplican rápidamente y eventualmente son consumidos en la formación de productos estables (dióxido de carbono y agua). Las características de tales radicales son: tiempo de vida media extremadamente corto y reactividad elevada.

El análisis termodinámico del proceso de combustión, requiere del conocimiento de los calores y entalpías de formación y de las capacidades de calor de las especies involucradas en el esquema. Si bien existe en la literatura información termodinámica

relativa a gran número de tales especies, no se tiene conocimiento preciso de todos los parámetros termodinámicos involucrados en el proceso.

TABLA 2.1

## ESQUEMA DE REACCION EMPLEADO PARA LA OXIDACION DEL METANO



Las limitaciones, en cuanto a valores de parámetros termodinámicos se refiere, ha conducido a que el análisis de las reacciones de combustión se enfoque de una manera más global, esto es, considerando solamente reacciones globales en las cuales se conozcan sus parámetros termodinámicos.

Por otra parte, los estudios cinéticos relacionados con la combustión se han enfrentado a la determinación de niveles de las especies químicas involucradas en el proceso y su evolución en el tiempo en un sistema dado, lo cual constituye un serio problema desde el punto de vista experimental. A pesar de lo anterior, se han propuesto modelos cinéticos en algunos casos de reacciones de combustión que contemplan a un buen porcentaje de las especies que intervienen en el proceso de combustión, pero su validación y consecuente aplicación se encuentra todavía en etapa de desarrollo e investigación.

Por lo tanto, el análisis cinético de las reacciones de combustión, ha seguido una línea similar al del análisis termodinámico, esto es, se ha enfocado a considerar reacciones de tipo global.

En las reacciones de combustión en las cuales el oxígeno se presenta mezclado con nitrógeno (aire), este último, reacciona con el primero dando lugar a la formación de óxidos de nitrógeno cuyo interés se ha acrecentado en los últimos años por sus efectos sobre el medio ambiente.

Los estudios realizados con la oxidación del nitrógeno, no son - objeto de análisis del presente trabajo y por lo tanto no se -- abundará en ello.

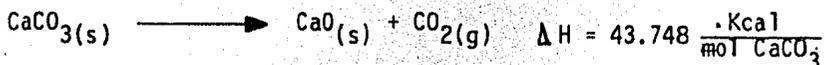
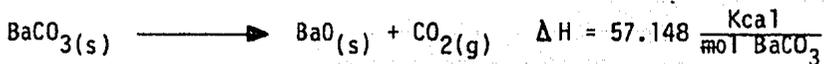
### 2.1.2 CALCINACION

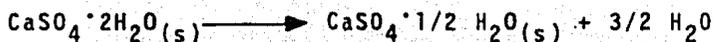
El término de calcinación se aplica en la actualidad para denotar un grupo de procesos cuyo esquema general es el siguiente:



El proceso puede ser tipo físico-químico (secado, eliminación de volátiles, etc.), y de tipo químico (reducción de minerales por ejemplo).

La evolución de gases y/o volátiles (esto es, generación de gases y/o sustancias volátiles al pasar líquidos o sólidos a fase vapor), en la calcinación aunado al generalmente, carácter endotérmico el proceso, hacen que los requerimientos de energía en esta operación elevados, por ejemplo:





$$\Delta H = 16.500 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}$$

Las condiciones a las cuales se llevan a cabo los procesos de calcinación, son de gran importancia debido a que pueden ocurrir reversibilidades en la reacción principal, ó bien, -ocurrir reacciones indeseables. Por ejemplo, en la calcinación del carbonato de bario, para obtener óxido de bario (56), la -reacción se debe efectuar en un medio con la menor cantidad de -oxígeno presente así como de dióxido de carbono, debido a que --por el oxígeno pueden presentarse reacciones posteriores, obteniéndose peróxido de bario en lugar del óxido de bario, así como, por la presencia de dióxido de carbono, se da la reversibilidad de la reacción y se obtiene nuevamente carbonato de bario. Otro ejemplo, en el cual las condiciones del proceso son importantes, es la calcinación del sulfato de calcio dihidratado, en donde --con un aumento en la temperatura de la reacción se forma el sulfato de calcio deshidratado, que es de menor importancia comercial que el sulfato de calcio que contiene media molécula de agua.

Las características termodinámicas globales de los principales -procesos de calcinación se encuentran en la actualidad reportados ampliamente en la literatura y son resultado de la investigación en ese campo a lo largo del presente siglo. Sin embargo, no ocurre así con las características cinéticas de los procesos de --

calcinación, aunque existen reportados algunos modelos cinéticos basados en la fenomenología del proceso (6,15)

### 2.1.3 REACCIONES SOLIDO-SOLIDO Y SOLIDO-GAS

En este punto se engloban aquellas reacciones que se presentan a altas temperaturas y que pueden ser oxidaciones ó reducciones y endo ó exotérmicas y que al igual que en las reacciones de calcinación, sus características termodinámicas globales se encuentran reportadas y analizadas en la literatura y en forma más restringida sus aspectos cinéticos (1,13,22,28,33,65).

Este tipo de reacciones presenta dos posibles esquemas que son:

a) Reacciones de oxidación:



b) Reacciones de reducción:



Se ha observado, que en este tipo de reacciones, la cantidad de los agentes oxidantes ó reductores, es de gran importancia, pues el exceso ó deficiencia de ellos lleva a obtener productos con características diferentes a las deseadas. Por ejemplo en la recuperación de metales contenidos en cenizas de carbón, por cloración (31), se nota que el aumento del agente reductor hasta cierto nivel ( $\text{COCl}_2$ ), incrementa la eficiencia de la reacción principal, pero si este agente reductor se encuentra en exceso sobre

tal límite, disminuye el rendimiento de la reacción principal y origina una mayor cantidad de productos no deseables (como el tetracloruro de silicio), debido a que se aumenta la velocidad de reacciones secundarias.

En gran parte, la alta eficiencia que se obtienen en las reacciones sólido-gas y principalmente en las sólido-sólido, se debe al hecho de tener un buen contacto entre las dos especies reaccionantes. Es por tal motivo que en las reacciones sólido-sólido, lo que suele presentarse es que uno de dichos sólidos tiende a fundirse y a entrar ó cubrir al otro sólido para que exista una mayor área de contacto entre ambas fases ó reactivos, con lo que se presentan fenómenos parecidos a los de sinterización.

## 2.2 PROCESOS FENOMENOLOGICOS DE REACCIONES A ALTAS TEMPERATURAS

Como se indicó en un principio, existen procesos que ocurren en forma similar en los tipos de reacción tratados en el presente trabajo, dichos procesos se encuentran en la tabla 2.2, donde se observa la incidencia que existe de los procesos en cada una de las reacciones como son en: combustión del tipo gas-gas, gas-líquido y gas-sólido, en las de calcinación y en las de sólido-sólido y sólido-gas.

A continuación se presenta una descripción global de cada uno de los procesos que se muestran en la tabla 2.2

## 2.2.1 CAMBIO DE FASE LIQUIDO-GAS Y SOLIDO-GAS

En las reacciones que se llevan a cabo a altas temperaturas se presentan con frecuencia cambios de fase de los materiales de proceso ó de impurezas que los acompañan. En la combustión, por ejemplo, se ha encontrado que la reacción del combustible con el oxígeno se lleva a cabo en fase gaseosa, por lo cual, los combustibles líquidos y sólidos cambian de estado líquido ó sólido a gaseoso antes de efectuarse la combustión propiamente dicha (26, 35,51,71). En el caso de combustibles líquidos, una atomización previa a la evaporación contribuye a aumentar considerablemente la velocidad de evaporación y, por lo tanto la velocidad de combustión global (49,51).

En procesos tales como calcinación ó reacciones sólido-sólido, en donde se manejan materiales sólidos, es común, que los acompañen materiales extraños (para el proceso), que forman impurezas y que generalmente son de bajo punto de ebullición ó de sublimación, por lo que al someterlos a un proceso de alta temperatura, son eliminados del material de proceso.

En los puntos que se tratan a continuación, se presenta de forma general, las características de los fenómenos de atomización, vaporización, sublimación y evolución de volátiles y como intervienen en los procesos de altas temperaturas.

TABLA 2.2  
FENOMENOLOGIA DE PROCESOS A ALTA TEMPERATURA

PROCESO	REACCION DE COMBUSTION		REACCION DE CALCINACION		REACCIONES	
	GAS-GAS	GAS-LIQUIDO	GAS-SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO-SOLIDO	SOLIDO-GAS
1.- CAMBIO DE FASE (LIQUIDO-GAS Y SOLIDO-GAS)						
- ATOMIZACION DE LIQUIDOS	-	*	-	-	-	-
- VAPORIZACION	-	*	-	*	*	-
- SUBLIMACION	-	*	*	*	*	*
- EVOLUCION DE VOLATILES	-	-	*	*	*	*
2.- TRANSFORMACION DE SOLIDOS						
- CAMBIO EN LA FASE SOLIDA	-	-	-	*	*	-
- SINTERIZACION	-	-	-	-	*	-
- REDUCCION DE TAMAÑO DE PARTICULA	-	-	*	*	*	*
- FRACTURA DE PARTICULA	-	-	*	*	*	*
- EVOLUCION DE POROS	-	-	*	*	-	*
3.- FENOMENOLOGIA DE FLAMA	*	*	*	-	-	-
4.- GENERACION DE ENERGIA	*	*	*	*	*	*
5.- TRANSFERENCIA DE ENERGIA						
- RADIACION	*	*	*	*	*	*
- CONDUCCION	-	-	*	*	*	*
- CONVECCION	-	-	*	*	*	*
6.- PERFILES DE TEMPERATURA						
- FLAMAS	*	*	*	-	-	-
- PELICULAS	-	-	*	*	-	*
- SÓLIDOS	-	-	*	*	*	*
7.- TRANSFERENCIA DE MASA	*	*	*	*	*	*

NOTA: El \* denota en que tipo de reacción incide el proceso fenomenológico de la columna del la izquierda

TABLA 2.2  
FENOMENOLOGIA DE PROCESOS A ALTA TEMPERATURA

PROCESO	REACCION DE COMBUSTION			REACCION DE CALCINACION	REACCIONES	
	GAS-GAS	GAS-LIQUIDO	GAS-SOLIDO	SOLIDO	SOLIDO-SOLIDO	SOLIDO-GAS
1.- CAMBIO DE FASE (LIQUIDO-GAS Y SOLIDO-GAS)						
- ATOMIZACION DE LIQUIDOS	-	*	-	-	-	-
- VAPORIZACION	-	*	-	*	*	-
- SUBLIMACION	-	*	*	*	*	*
- EVOLUCION DE VOLATILES	-	-	*	*	*	*
2.- TRANSFORMACION DE SOLIDOS						
- CAMBIO EN LA FASE SOLIDA	-	-	-	*	*	-
- SINTERIZACION	-	-	-	-	*	-
- REDUCCION DE TAMAÑO DE PARTICULA	-	-	*	*	*	*
- FRACTURA DE PARTICULA	-	-	*	*	*	*
- EVOLUCION DE POROS	-	-	*	*	-	*
3.- FENOMENOLOGIA DE FLAMA	*	*	*	-	-	-
4.- GENERACION DE ENERGIA	*	*	*	*	*	*
5.- TRANSFERENCIA DE ENERGIA						
- RADIACION	*	*	*	*	*	*
- CONDUCCION	-	-	*	*	*	*
- CONVECCION	-	-	*	*	*	*
6.- PERFILES DE TEMPERATURA						
- FLAMAS	*	*	*	-	-	-
- PELICULAS	-	-	*	*	-	*
- SOLIDOS	-	-	*	*	*	*
7.- TRANSFERENCIA DE MASA	*	*	*	*	*	*

NOTA: El \* denota en que tipo de reacción incide el proceso fenomenológico de la columna del la izquierda

## A. ATOMIZACION DE LIQUIDOS

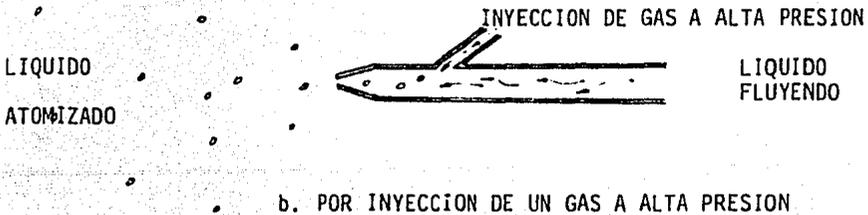
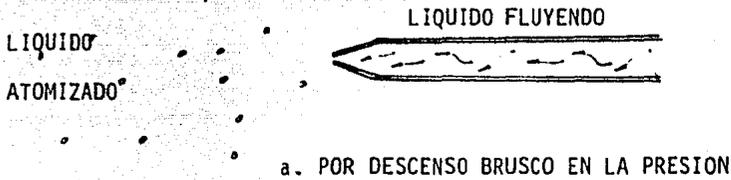
La atomización de una corriente líquida, es un fenómeno que se presenta en las reacciones de combustión, y consiste de la formación de pequeñas gotas, acción mediante la cual se facilita la vaporización del combustible con lo que se incrementa la eficiencia de la reacción.

La atomización puede llevarse a cabo mediante un descenso brusco en la presión del fluido al cambiar el área transversal de flujo de éste, ó mediante la incidencia de una corriente gaseosa a alta velocidad sobre la corriente líquida del combustible como se muestra esquemáticamente en la figura 2.1, (51). En algunos casos, cuando el líquido es demasiado denso, la atomización no se lleva a cabo en una sola etapa, por ejemplo, en el caso de hidrocarburos pesados, se recomienda "atomizar" previamente el combustible y transportarlo al quemador, en donde se vuelve a atomizar para que pueda reaccionar adecuadamente, como medio de transporte se recomienda utilizar algún gas, que puede ser vapor de agua, aire, gas natural, etc. (49).

## B. VAPORIZACION

La vaporización es un fenómeno que se presenta en las operaciones a alta temperatura, cuando se manejan reactivos líquidos, ya sea como combustible ó en suspensiones de materiales sólido-líquido.

FIGURA 2.1  
ATOMIZACION DE UN LIQUIDO COMBUSTIBLE



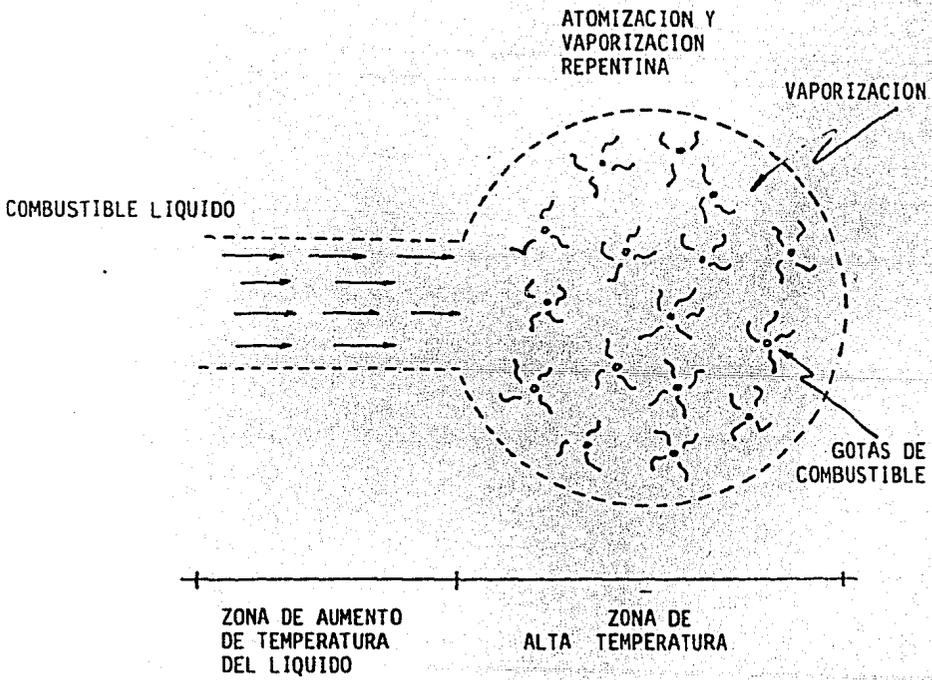
La vaporización, como su nombre lo indica, consiste en el cambio de fase líquida a gaseosa de los materiales reaccionantes debido a las altas temperaturas prevalecientes en el sistema (superiores a las de ebullición de los materiales), y es más rápida cuando la corriente es atomizada previamente debido a la formación de una mayor área de vaporización.

En el caso de combustión de una corriente líquida, si el combustible ha sido atomizado previamente, la vaporización es casi instantánea, al entrar el reactivo a la cámara de combustión, debido a la alta temperatura que se maneja en esta zona.

Antes de ocurrir la vaporización, el líquido aumenta normalmente su temperatura a niveles cercanos a los de la zona de combustión por efecto de conducción, convección y por radiación de energía a través de los ductos que manejan el combustible y por medio de sistemas de recuperación de calor en el proceso como se ilustra en la figura 2.2.

La vaporización de líquido de suspensiones líquido-sólido no se lleva a cabo tan rápidamente como en el caso antes mencionado, debido principalmente a que ocurre a temperaturas substancialmente más bajas que las que se alcanzan en las zonas de combustión; aún así, este proceso ocurre a tiempos relativamente cortos (dependiendo de las características del proceso), ocasionado por el nivel de temperatura por una parte y por la velocidad a la que

FIGURA 2.2  
VAPORIZACION DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS  
DURANTE LA COMBUSTION



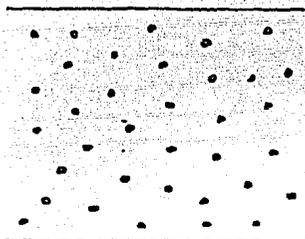
normalmente se transportan los vapores fuera de la zona de vaporización. Los niveles de turbulencia en las zonas de contacto - vapor-suspensión son generalmente altos, ocasionando una resistencia al transporte de masa despreciable en las proximidades de la interfase, este proceso se representa esquemáticamente en la figura 2.3.

### C. SUBLIMACION

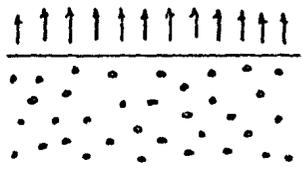
La sublimación se presenta en las reacciones de combustión gas-sólido, de calcinación y sólido-sólido. En las reacciones de combustión el material reactivo en fase sólida, normalmente pasa a la fase gaseosa antes de la reacción, este cambio de fase se realiza cuando el combustible entra al sistema donde se lleva a cabo la reacción. La sublimación es un proceso casi instantáneo y depende de la temperatura del medio y del tamaño de la partícula, se ha observado (23), que para partículas de carbón se lleva menos de un segundo para tamaños de 0.2 micras de diámetro, y de seis a diez segundos para 3.0 micras. Antes de entrar al sistema, el material incrementa su temperatura hasta un nivel cercano al existente en la cámara de combustión por medio de los mecanismos de convección, conducción y radiación en los ductos que manejan el material.

En las reacciones de calcinación el proceso de sublimación se presenta al cambiar de estado físico las impurezas que acompañan al

FIGURA 2.3  
 VAPORIZACION DE LIQUIDOS EN  
 SUSPENSIONES LIQUIDO-SOLIDO

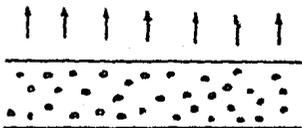


a. AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE LA SUSPENSION



b. VAPORIZACION DEL LIQUIDO

c. CONCENTRACION DE LA SUSPENSION



d. AUMENTO DE LA TEMPERATURA DEL SOLIDO



material a calcinar, esto es, al alimentar el material se le aumenta su temperatura hasta que se llega a la de sublimación de las impurezas sólidas que le acompañan, al pasar del estado sólido al gaseoso absorben calor sensible y latente; por otra parte al desprenderse contribuyen al aumento de la superficie activa del material a calcinarse.

En las reacciones sólido-sólido existen algunas de ellas en las cuales, los reactivos incrementan su temperatura hasta llegar a la de sublimación de uno de los sólidos, pudiéndose llevar después la reacción en estado sólido-gas; el aumento de temperatura comienza al alimentar el material a reaccionar y se lleva a cabo por los tres mecanismos de transferencia de calor conocidos. En las reacciones sólido-gas, la sublimación puede presentarse en la eliminación de impurezas sólidas que acompañan al reactivo sólido, esto es, al llegar a cierta temperatura las impurezas sólidas de bajo punto de sublimación, empiezan a absorber calor sensible y latente para el cambio de fase (de sólido a gas), con su posterior eliminación, contribuyendo al incremento de la superficie efectiva del material reaccionante.

#### D. EVOLUCION DE VOLATILES

En las reacciones a alta temperatura, la formación de volátiles es un fenómeno que se presenta con bastante frecuencia. Estos volátiles se forman como resultado del cambio de fase de posibles

impurezas presentes en los reactivos sólidos, que están en fase sólida ó líquida y que al fusionarse y vaporizarse forman estos gases (en el caso de sólido, el cambio de fase puede ser directamente por sublimación).

Un incremento de temperatura de sólidos ocasiona el cambio de fase de las impurezas pudiendo ser, primeramente líquidas, cuando las impurezas son originalmente sólidas y después cambiar a la - fase gaseosa, que al escapar, ~~ayudan a~~ <sup>ayudan a</sup> incrementar la superficie del material.

Una diferencia entre los casos que manejan reactivos sólidos que continenen impurezas líquidas ó sólidas, es el tiempo en el que se lleve a cabo la volatilización de éstas, en otras palabras, si el incremento de temperatura en el sólido es lo suficientemente rápido, el cambio de fase de sólido a líquido y de líquido a gas ó de líquido a gas directamente, es instantáneo (caso de los procesos de combustión), mientras que en los casos en el que el aumento de temperatura no es tan brusco, la volatilización no es - instantánea, como ocurre en procesos de calcianción (31,32).

### 2.2.2 TRANSFORMACION DE SOLIDOS

Al efectuarse una reacción a alta temperatura, que involucre materiales sólidos, es común que se presenten fenómenos como: reestructuración molecular, sinterización, reducción de tamaño de -

partícula o evolución de poros.

Algunos de estos fenómenos son el objetivo de la operación, como por ejemplo, la reestructuración molecular de sustancias, como el carbón para electrodos (19), o el dióxido de titanio para pinturas (12), pero otros se pueden presentar en forma inesperada e indeseable (por ejemplo la sinterización de un material a calentar con una impureza que lo acompañe).

La reducción de tamaño de partícula, la fractura de la misma y la formación de poros, son fenómenos que se presentan en algunos materiales específicos, y que en algunos casos son susceptibles de controlar (por ejemplo la fractura del material, se evita controlando la velocidad a la que se incrementa la temperatura), o puede ser indicativo del grado de avance de la reacción, por ejemplo la reducción del tamaño de la partícula en un proceso de calcinación (sulfato de calcio, 52), etc., en las siguientes secciones se consideran estos fenómenos característicos de los reactivos sólidos en las operaciones consideradas.

#### A. CAMBIO EN LA FASE SOLIDA

Se refiere al fenómeno mediante el cual un sólido que se somete a alta temperatura, cambia su estructura molecular. Este fenómeno ocurre en los procesos de calcinación y en las reacciones que involucran un reactivo sólido.

Los cambios que sufre un material al calcinarse, en su estructura cristalina, son afectados por la separación de volátiles contenidos en el material y por el cambio de dimensiones en el mismo. Por ejemplo, en la calcinación del coque (19), el grado de orientación y la naturaleza estructural del material, influyen en el coeficiente de expansión térmica, siendo en el coque con estructura molecular en forma de agujas, el coeficiente de expansión térmica bajo. Una estructura conformada con micro-poros en el sólido, tiene la función de absorber la expansión de los cristales por efectos de absorción de calor. Una forma de producir los micro-poros es mediante un calentamiento por etapas, al concluirse la primer etapa de calentamiento se sigue de una etapa de enfriamiento, con lo que el material se reduce conforme se enfría, y al volverse a calentar, se forman micro-poros causados por los esfuzos debido a la expansión y contracción causados por el tratamiento térmico.

Otro ejemplo interesante, es el de la calcinación de óxido de titanio, de su forma natural (anastasa) a rutilo (12), proceso mediante el cual se le proporciona de características específicas a cada material, y entre las características principales, es el de que se ocasiona un cambio en el color, de pardo ó negro en el óxido de titanio de forma anastasa, a blanco en su forma rutilo, el cual se utiliza en la manufactura de pinturas.

## B. SINTERIZACION

La sinterización es la operación por medio de la cual se aglomera un material, puede presentarse en los procesos de:

- Calcinación
- Reacciones sólido-gas
- Reacciones sólido-sólido

El proceso de sinterización comprende los siguientes pasos:

- Compactación del material a sinterizar (por efecto del peso del reactivo sobre sí mismo).
- Aumento de temperatura del material.
- Absorción de calor latente de impurezas volátiles con su consecuente eliminación.
- Aglomeración propiamente dicha del material con que se trabaja.

Aunque no se pretenda sinterizar en algunas ocasiones, cuando se trabaja en las operaciones a alta temperatura, se observa que se presentan las condiciones requeridas para que este proceso se efectúe.

Se supone que al aumentar la temperatura del sistema, se debilita la estructura molecular del material, presentándose ya sea una

fusión de uno de los componentes (en caso de que se presente el material con alguna impureza ó en el caso de una reacción sólido-sólido), ó por reacomodo de las partículas del material puro.

### C. REDUCCION DE TAMAÑO DE PARTICULA

Este es un proceso exclusivo de los sistemas en los cuales uno de los componentes al menos, es del tipo sólido tal como:

- Reacciones de combustión sólido-gas.
- Reacciones de calcinación.
- Reacciones sólido-gas y sólido-sólido

En el primer caso, la reducción del tamaño de partícula ocurre en el proceso de combustión debido a la sublimación del combustible así como a la eliminación de volátiles, siendo tal disminución hasta un momento en el cual la temperatura es tal que la partícula se inflama por sí misma y se consume (26,35).

En los casos de las reacciones de calcinación, generalmente ocurre una disminución en el tamaño de partícula debido a que uno de los productos de dicho proceso es gaseoso y al desalojarse de la partícula el tamaño de ésta se ve reducido. Por ejemplo, en la reacción de calcinación del sulfato de calcio dihidratado (52), en donde el producto es de cuatro a siete veces de menor tamaño que el material alimentado. En algunas ocasiones la

evolución del producto puede causar una estructura porosa, dicho fenómeno se considera en un apartado posterior.

En el último caso, la disminución en el tamaño de partícula se puede deber a una situación parecida a la presente en la operación de calcinación en la que uno de los productos se encuentra en fase gaseosa, o bien si el producto es un sólido de menor densidad, ocurriendo un proceso en el cual el sólido reactivo, al estar reaccionando va disminuyendo su tamaño conforme se va formando el producto, llamándosele a este proceso núcleo menguante (37). Otra forma de reducción de tamaño de partícula es por rompimiento de éstas que se tratan posteriormente; ejemplos de los procesos de reducción de tamaño de partícula se muestran en la figura 2.4.

#### D. FRACTURA DE PARTICULAS

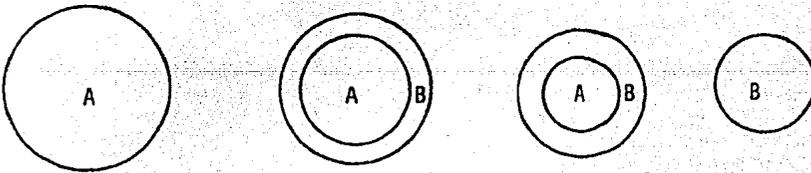
El rompimiento de partículas es un proceso que se efectúa cuando la reacción con algún sólido (como reactivo principal), sufre un elevado y súbito incremento de temperatura.

Este fenómeno se debe principalmente a que las impurezas volátiles contenidas en las partículas elevan su presión de vapor bruscamente, debido al incremento de temperatura al que se ven sometidas. Tal incremento brusco en la presión de vapor, puede llegar hasta un punto tal, en el cual se vence la resistencia mecánica

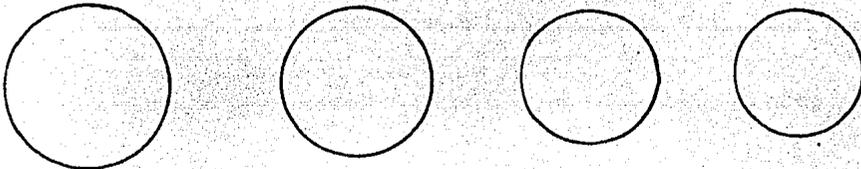
FIGURA 2.4  
REDUCCION DE TAMAÑO DE PARTICULAS



a. EN PROCESOS DE COMBUSTION



b. POR NUCLEO MENGUANTE



c. POR VOLATILIZACION DE IMPUREZAS.

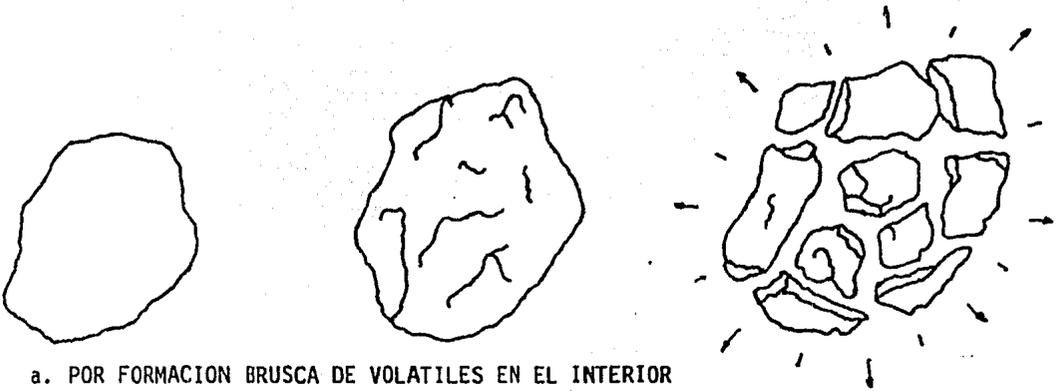
del sólido, ocurriendo la fractura de la partícula como se muestra en la figura 2.5a.

Dicho contenido de volátiles puede deberse a líquidos contenidos en el sólido (como agua), impurezas ó a la formación de compuestos de bajo punto de ebullición. Aunado al fenómeno descrito anteriormente, la fractura del material ocurre debido a que la estructura porosa de éste (original ó como producto de la reacción), no es lo suficientemente grande y eficiente como para permitir la rápida evolución de los volátiles ó de los productos de la reacción, que tienen su presión de vapor muy grande.

También es causa de fractura de partículas el cambio de los coeficientes de expansión térmica de los sólidos, con respecto a la temperatura, debido a que puede suceder que el cambio en el coeficiente de expansión térmica en un sólido dado sea tan elevado, que el sólido no se pueda contener a sí mismo, es decir que las propiedades mecánicas del sólido sean vencidas.

De igual forma, ocurre un proceso de rompimiento ó de rozamiento de partículas (en inglés *attrition*), por el frotamiento que existe entre partículas, por ejemplo cuando se encuentran en sistemas fluidos (fluidización); ó bien por el rozamiento ó fricción existente entre las partículas sólidas y el fluido que las rodea, como se muestra en la figura 2.5b.

FIGURA 2.5  
FRACTURA DE PARTICULAS



a. POR FORMACION BRUSCA DE VOLATILES EN EL INTERIOR



b. FROTAMIENTO DE PARTICULAS EN SISTEMAS FLUIDOS

## E. EVOLUCION DE POROS

Este fenómeno se presenta frecuentemente en las reacciones que manejan sólidos como son:

- Combustión sólido-gas
- Calcinación
- Reacciones sólido-gas ó sólido-sólido

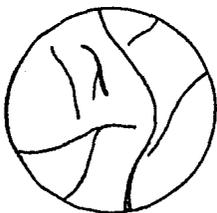
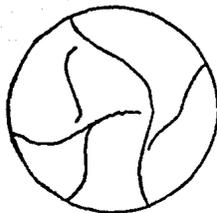
y se debe tanto al aumento de temperatura como para a la formación y/o desalojo de volátiles en la partícula.

La formación de poros es explicable desde el punto de vista en el que por ejemplo al aumentar la presión de vapor de las impurezas que acompañan a un sólido, éste se fractura, al ir aumentando la temperatura y la presión de las partes remanentes de la partícula los volátiles atrapados siempre van evolucionando el tamaño de los poros (figura 2.6).

Los procesos donde se observa más este tipo de situación, es en la calcinación, donde la evolución de la reacción hace que la eliminación de gases vaya formando micro-poros, que luego se unen para formar poros de mayores dimensiones.

Este tipo de procesos han sido muy útiles en la producción de por ejemplo; carbón grafitado para la elaboración de electrodos,

FIGURA 2.6  
EVOLUCION DE POROS EN EL INTERIOR DE  
UNA PARTICULA



donde por un método de dos etapas (18), se obtiene un carbón con menor coeficiente de expansión térmica debido a la formación de micro-poros que además no afectan las propiedades mecánicas del sólido.

### 2.2.3 FENOMENOLOGIA DE FLAMAS

En los procesos a alta temperatura, es importante considerar el aspecto fenomenológico de la flama, que origina la energía en forma de calor responsable de que estas operaciones se puedan llevar a cabo. Como es conocido, se presentan varios tipos de flamas, y cada una de ellas tiene características especiales, por lo que a continuación, se introduce de manera general la fenomenología de flamas.

En las flamas, fenomenológicamente hablando, se presentan dos aspectos importantes; temperatura y turbulencia, que determinan el color y la forma de la flama.

El color de la flama que se produce, depende de la temperatura, que se logre obtener en el sistema; cuando la temperatura es alta, la gran actividad de los electrones exteriores de las moléculas de los productos (electrones de valencia), al pasar de estados energéticos superiores a inferiores, generan ondas electromagnéticas de longitudes correspondientes al rango del espectro visible, esta es la razón por la cual cuando se lleva a cabo la

combustión completa de un combustible rápidamente, ó cuando se tiene un poder calorífico alto, la flama es de color azul; la flama de color amarillo se presenta cuando hay una combustión de ficiente, (para ver las zonas de temperatura en una flama, consultar el apartado de perfiles de temperatura), esto es, cuando la combustión no es completa ó el combustible no es capaz de alcanzar altas temperaturas, los electrones de la capa de valencia de los productos tienen una actividad que genera una radiación que corresponde al color amarillo del espectro visible.

Como se sabe, el movimiento de los electrones de las capas ex- ternas de los productos de la combustión, es el responsable de la coloración de la flama, pero también se presentan movimientos rotacionales y vibracionales, que generan ondas electromagné ticas que corresponden a longitudes de onda del infrarrojo, de las cuales se origina la transmisión de calor por radiación en la flama.

En el caso de una combustión con reactivos líquidos ó sólidos, éstos previamente se vaporizan ó subliman (ver ignición de gas).

Se puede obtener una flama azul si el reactivo es vaporizado com pletamente y distribuido en forma homogénea en el aire antes del encendido. La combustión de flama azul se presenta como un meca nismo de dos etapas, siendo la hidroxilación la primera de ellas. La flama amarilla indica el resplandor de partículas de carbón -

debido a la pirólisis del combustible en las partes de la flama con deficiencias de oxígeno, cuando el combustible no es sublimado ó vaporizado completamente las partículas residuales se descomponen parcialmente y se queman como partículas de coque (34).

En la combustión con reactivos gas-gas se presentan también las coloraciones azul y amarilla en las flamas, dependiendo del momento en el que se mezclan los reactivos, si se mezclan antes de la ignición la combustión se realiza mediante la hidroxilación. Esto es, que el combustible y el oxígeno forman compuestos hidroxilados, además de radicales libres ( $\text{OH}^\cdot$ ,  $\text{H}^\cdot$ ,  $\text{O}^\cdot$ ,  $\text{HO}_2^\cdot$ ), y otras especies intermedias ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , y productos de descomposición de hidrocarburos parcialmente oxidados). Por algún tiempo puede haber ó no un ligero aumento de temperatura, la energía es almacenada en los radicales libres y liberada posteriormente. En esta etapa las reacciones son muy lentas, casi isotérmicas y con flamas muy frías, esta etapa se detiene cuando comienza la producción de productos estables como aldehídos, peróxidos e hidrocarburos ligeros. Posteriormente la adición de calor y oxígeno descomponen los aldehídos en hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua. Conforme se convierte el carbón del combustible el aldehído en las etapas iniciales de mezcla no se forma hollín y se obtiene una flama azul.

Se tiene una flama amarilla cuando se produce una degradación al agregar oxígeno al combustible caliente, descomponiéndose en -

carbón e hidrógeno que cuando se combinan con oxígeno, forman dióxido de carbono y agua, se forman hollín si no hay suficiente cantidad de oxígeno, esto es, la formación de hollín es resultado de una insuficiente cantidad de agente oxidante en el medio, lo que ocasiona que el carbón del combustible no reaccione completamente y abandone la flama, en forma de partículas finas suspendidas en los gases de combustión.

En la mayor parte del sistema de combustión, el grado de ionización es pequeño, siendo la energía requerida para la disociación el factor predominante, así que la máxima temperatura de flama depende de la extensión de la disociación de los productos de combustión. Como se aprecia en la siguiente fórmula:

$$T_f = (\Delta H_R - \Delta H_D) / C \quad (2.8)$$

Donde:

$T_f$  : Máxima temperatura de flama

$\Delta H_R$  : Energía disponible del proceso de combustión al dar productos sin disociar

$\Delta H_D$  : Energía requerida para disociar (y ionizar) los productos

$C$  : Capacidad calorífica total de los productos

Para obtener altas temperaturas de flamas no solo el valor de  $H_R$  debe ser grande, sino que los productos de la combustión deben consistir de moléculas estables para minimizar la disociación.

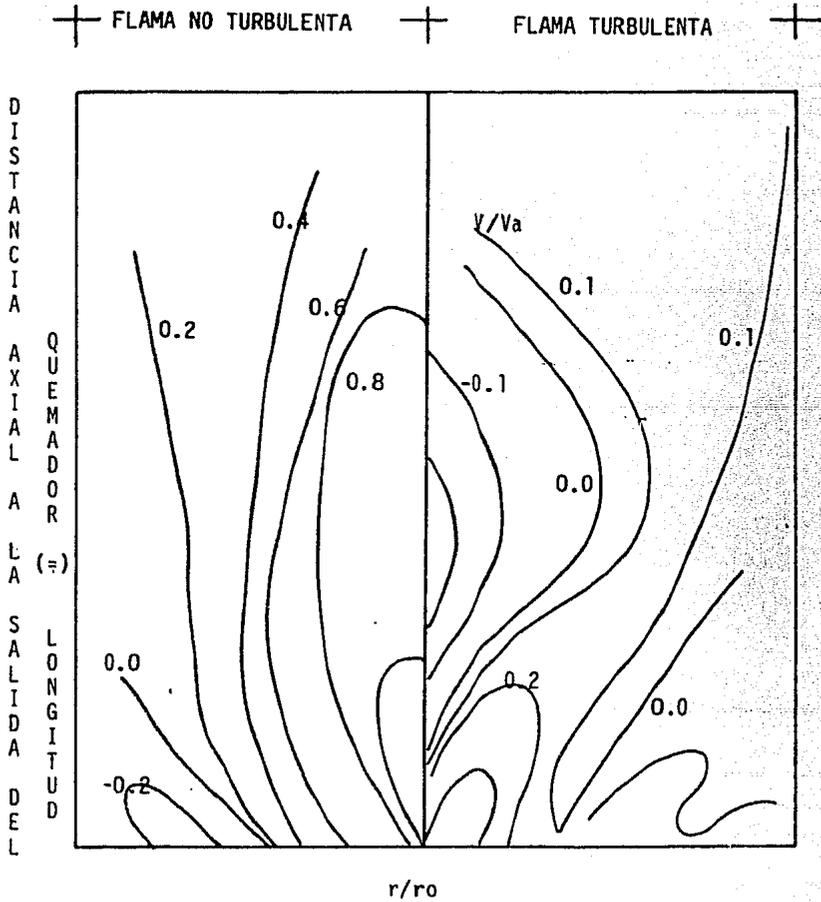
Un criterio para evaluar la resistencia de una molécula a la disociación es la temperatura de unión, que se define como la temperatura a la cual el cambio de energía libre estándar de la reacción de disociación es cero, esto es, la temperatura a la cual la constante de equilibrio tiene el valor de uno, la capacidad calorífica se incrementa también con la disociación y conduce a disminuir la temperatura máxima de flama.

Idealmente en un sistema en el que el mezclado es instantáneo, la intensidad de la combustión está limitada por la velocidad de la reacción química, pero en realidad esta intensidad de combustión se limita tanto por la velocidad de reacción, como por la eficiencia del proceso de mezclado ó de turbulencia logrado.

En una flama trubulenta se observa una mayor recirculación que en el caso de ausencia de turbulencia, además de que la trubulencia se incrementa por las grandes velocidades axiales, que se generan en la combustión y de las reducciones de la densidad, asociadas a ella. En la figura 2.7, se muestran los perfiles de recirculación en una flama cuando existe y no turbulencia (2).

La turbulencia reduce la longitud de la flama, además, un exceso de aire también reduce la longitud de ésta, como lo muestran las investigaciones realizadas por Mc Fayden & Page (27), sobre simulaciones de flamas, y cuyos datos se presentan en la figura 2.8.

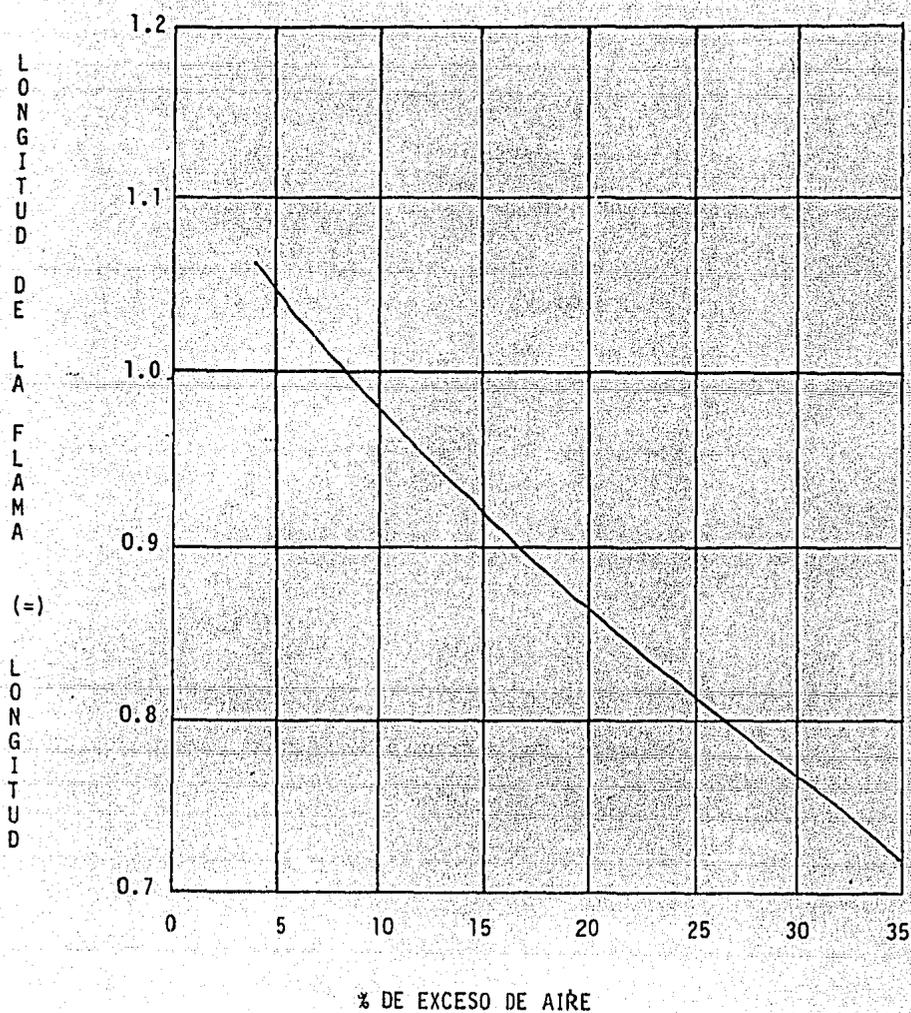
FIGURA 2.7  
 PERFILES DE VELOCIDAD CONSTANTE (( $v/v_a$ )  
 VELOCIDAD AXIAL MEDIA/VELOCIDAD AXIAL A  
 LA SALIDA DEL QUEMADOR)



r : RADIO (+) LONGITUD

r<sub>o</sub> : RADIO INTERNO DE LA BOQUILLA DEL QUEMADOR (=) LONGITUD

FIGURA 2.8  
EFECTO DE PORCENTAJE DE EXCESO DE AIRE  
EN LA LONGITUD DE UNA FLAMA



Esta reducción de tamaño se explica por la presencia del exceso de aire, que permite que el combustible reaccione completamente, cerca de la salida del quemador.

Se pueden obtener mayores temperaturas, así como un ahorro de combustible (29), si los reactivos son precalentados, ó si se utiliza oxígeno puro en lugar de aire.

A bajos niveles de precalentamiento, la disociación es pequeña y la temperatura de la flama se incrementa linealmente con la temperatura inicial (71).

La utilización de oxígeno en lugar de aire elimina el efecto diluyente del nitrógeno, con la consecuente reducción en el volumen de los reactivos para la misma entrada de energía calorífica, además de que se abate la emisión de óxidos de nitrógeno al medio.

#### 2.2.4 GENERACION DE RADIACION

La generación de radiación es, uno de los aspectos más importantes en un proceso a alta temperatura, debido a que, la radiación es el mecanismo de transferencia de calor más significativo en este tipo de operaciones.

La radiación es un fenómeno que se presenta en todos los tipos de reacción a alta temperatura, y puede ser producto de una reacción

(reacción exotérmica), o por la transferencia de energía calorífica.

En las reacciones de combustión, es más común que se genere la radiación debido a que los productos de ésta (principalmente agua y dióxido de carbono), aumentan su temperatura con lo que -- sus movimiento rotacionales y vibracionales se incrementan, causando la disipación de la energía calorífica en forma de ondas - electromagnéticas con longitudes de onda que caen en el rango de la banda espectral del infrarojo.

En la combustión, las únicas fuentes de radiación son los productos de esta, y se supone que tienen temperatura uniforme. Los gases diatómicos tales como el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, tienen valores de emisividades de radiación muy bajos. Por otra parte, el agua, dióxido de carbono y dióxido de azufre, tienen valores de emisividad de radiación elevados (aunque menores que los de muchos sólidos), y el monóxido de carbono tiene una emisividad del tipo medio. Por lo tanto se considera como únicos contribuyentes radiantes, al agua y dióxido de carbono, puesto que la mayoría de los combustible empleados tienen poca cantidad de azufre. La emisión de radiación en las moléculas de gases aumenta debido a la complejidad de la estructura molecular, ya que aumentan los modos vibracionales y rotacionales. Esto es, en moléculas monoatómicas, se tiene un solo movimiento rotacional, mientras que en moléculas diatómicas, sus movimientos rotacionales -

se consideran ya en base a dos ejes, y en moléculas con mayor -- cantidad de átomos, aumentan sus movimientos rotacionales así como sus movientos vibracionales (debido a la tensión y flexión de los átomos que forman las moléculas), aumentando por lo tanto las posibilidades de absorción y emisión de ondas electromagnéticas en la región del infrarojo.

Al incidir la radiación en una partícula, esta empieza a absorber parte de la energía incidente, con lo que comienza a aumentar -- paulatinamente sus movimientos rotacionales y vibracionales, - así como su temperatura, hasta un punto en el cual la partícula comienza a generar radiación, de manera similar a las fuentes de generación.

#### 2.2.5 TRANSFERENCIA DE ENERGIA

Debido a que los procesos tratados en el presente trabajo son a temperaturas elevadas, se hace necesario entender la fenomenología de la transferencia de calor en las diferentes etapas por las que atraviesan dichos procesos.

La transferencia de calor se efectúa por los mecanismos de transferencia de energía calorífica conocidos y que son:

- Convección
- Conducción
- Radiación

Los cuales en cierta etapa del proceso son de especial importancia, es decir, al inicio del calentamiento de los materiales, - los mecanismos de transferencia significativos son los de convección y/o conducción dependiendo del estado físico de los reactivos (líquido, gaseoso ó sólido); mientras que a las temperaturas de reacción, el mecanismo prevaleciente es el de radiación.

A continuación se explican cada uno de los mecanismos con base - en los procesos estudiados en este trabajo.

#### A. TRANSFERENCIA DE ENERGIA POR CONDUCCION

La transferencia de energía por conducción es uno de los mecanismos de transferencia de calor que ocurren en los procesos a altas temperaturas; éste se verifica cuando existe un reactivo y/o producto sólido; y en proporción a los otros dos mecanismos que se presentan éste es relativamente despreciable.

La transferencia de energía por conducción ocurre a velocidades relativamente altas durante el calentamiento de la partícula por los altos gradientes de temperatura a la que se somete; como consecuencia de estos altos gradientes el tiempo en que se efectúa este tipo de transferencia es relativamente corto, por ejemplo, el carbonato de calcio incrementa su temperatura de 100 a 500°F en  $6.89 \times 10^{-5}$  hrs cuando los gases de combustión se encuentran a 2,000°F, en  $1.38 \times 10^{-4}$  hrs de 100 a 800°F y en  $1.71 \times 10^{-4}$  hrs

de 100 a 500°F cuando los gases de combustión se encuentran a 1,000°F.

Como puede observarse, el incremento casi instantáneo de temperatura se origina por la diferencia de la misma a la que es sometida la partícula y que trae como consecuencia que la resistencia al flujo de calor, aunque de magnitud considerable, sea despreciable en comparación con el gradiente de temperatura.

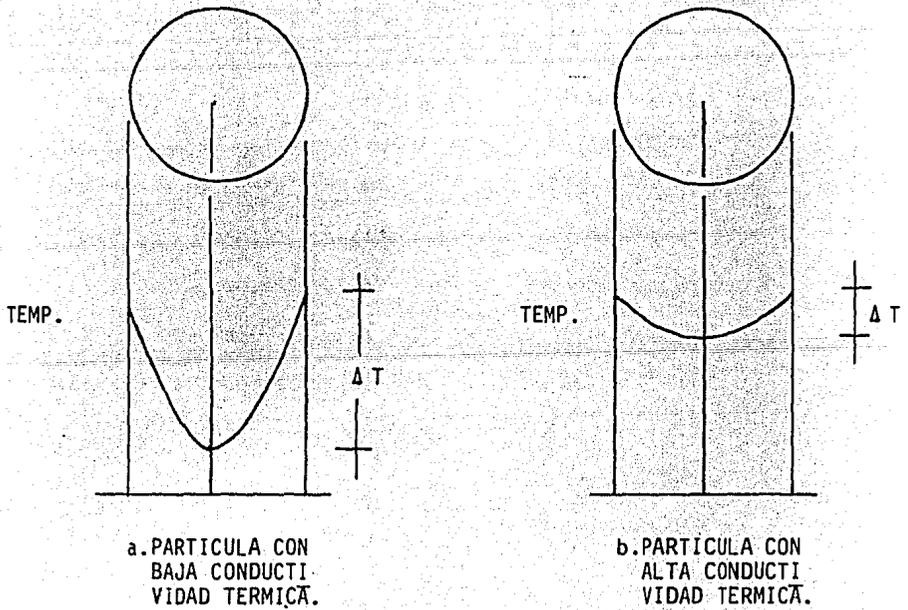
En la figura 2.9 se presenta el perfil de temperatura que se forma dentro de una partícula debido a la influencia del gradiente de temperatura y la resistencia que ofrece.

#### B. TRANSFERENCIA DE ENERGIA POR CONVECCION

La transferencia de energía calorífica por convección en los procesos a altas temperaturas se presenta en forma natural (por diferencia de densidades), en los casos en que se tienen las fases sólido-fluido; ó cuando existen condiciones de flujo turbulento (convección forzada).

Este tipo de transferencia, se lleva a cabo entre el fluido y la superficie del sólido en donde se forma una película de fluido interfacial que debe vencerse para que la transferencia evolucione; este mecanismo es importante en las etapas de calentamiento de la partícula, pues en dichas etapas la temperatura aún no alcanza

FIGURA 2.9  
PERFIL DE TEMPERATURA EN UNA PARTICULA  
SOLIDA



los niveles en que se genera radiación, asimismo en estas etapas de calentamiento es de gran importancia el mecanismo de conducción.

Por otro lado, cuando la temperatura es elevada, el mecanismo de transferencia por convección es de poca importancia (menor a un 20%(24)), y el mecanismo de transferencia por radiación es el dominante.

Por lo tanto el mecanismo de transferencia de calor por convección, es importante en las etapas de calentamiento de reactivos, principalmente, cuando éstos se encuentran en fase fluida. También se considera de importancia a este mecanismo en la parte del proceso, donde se enfrían los productos ó donde la radiación deja de ser el mecanismo principal, por ejemplo, existen hornos en donde, en las zonas de proceso posteriores a la de radiación, se transfiere calor por convección (conocidas como zonas de convección), en las cuales este es el mecanismo principal de transferencia de calor.

### C. TRANSFERENCIA DE ENERGIA POR RADIACION

En los procesos a alta temperatura el mecanismo de transferencia de calor predominante es el de radiación, debido a que la convección no es lo suficientemente rápida para disipar la elevada cantidad de energía manejada. Es decir, las fuentes primarias de generación de energía radiante (productos de combustión), emiten

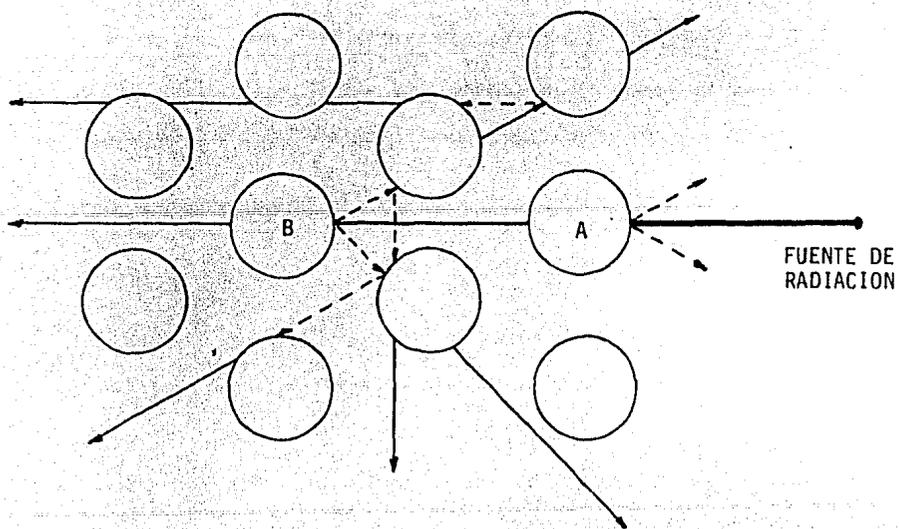
ó transfieren la energía de ondas electromagnéticas a través del medio a los reactivos sólidos ó gaseosos que absorben, dejan pasar y reflejan ciertas cantidades de esta energía.

En la figura 2.10 se muestra el efecto de una onda electromagnética sobre una serie de partículas sólidas, se aprecia que al incidir esta onda sobre las partículas A y B y traspasarlas, su intensidad se ve disminuida (líneas desvanecidas), esta disminución en la intensidad de la onda se debe a la absorción de energía -- por parte de la partícula, que aumenta su temperatura hasta un punto en el cual dicha energía excita a las partículas sólidas -- incrementando su movimiento vibracional hasta que por efecto del regreso al estado de menor energía, la partícula emite ondas radiantes, convirtiéndose en una fuente emisora de radiación.

Por otro lado, una parte de la energía que incide sobre las partículas A y B es reflejada en forma de ondas con menor intensidad (líneas discontinuas). Estas ondas reflejadas se convierten en ondas incidentes para otras partículas, repitiéndose el mismo efecto.

Algunos materiales de construcción (como el hierro forjado y el hierro colado), y ciertos refractarios (ladrillos), tienen emisividades del orden de magnitud de los productos de combustión ( $\approx 0.95$ ), por lo que durante los procesos a altas temperaturas -- pueden convertirse en fuentes emisoras de radiación con lo que

FIGURA 2.10  
TRAYECTORIA DE LA RADIACION  
(ONDAS ELECTROMAGNETICAS),  
DE UN SISTEMA DE PARTICULAS



la transferencia por este mecanismo se mejora (principalmente en el caso de los materiales de construcción).

#### 2.2.6 PERFILES DE TEMPERATURA

En las reacciones de altas temperaturas, los materiales de proceso no incrementan su temperatura uniformemente a lo largo del proceso debido a múltiples factores entre los cuales se tienen:

- Los materiales de proceso atraviesan zonas de temperaturas diferentes
- Las propiedades termoquímicas de los reactivos y productos de proceso
- Las características de cada proceso

Los perfiles de temperatura ayudan a comprender cual es la evolución de un proceso, contribuyendo así al estudio de éste.

Tal es el motivo de presentar un apartado en este trabajo, sobre los perfiles de temperatura en los procesos de altas temperaturas.

#### A. PERFILES DE TEMPERATURA EN FLAMAS

La mayoría de los procesos de combustión, tienen como característica, presentar una flama colorida, que indica como evoluciona -

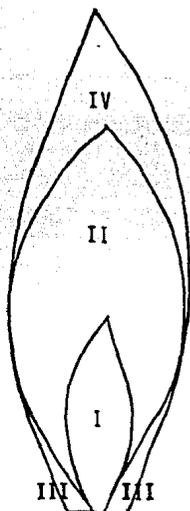
la reacción así como de cuantas etapas consta el proceso completo de combustión. Cada una de estas etapas, se lleva a cabo en una cierta zona de la flama. Las principales zonas que se presentan en una flama convencional son:

- Zona oscuro
- Zona luminosa amarilla
- Zona azul
- Zona incolora

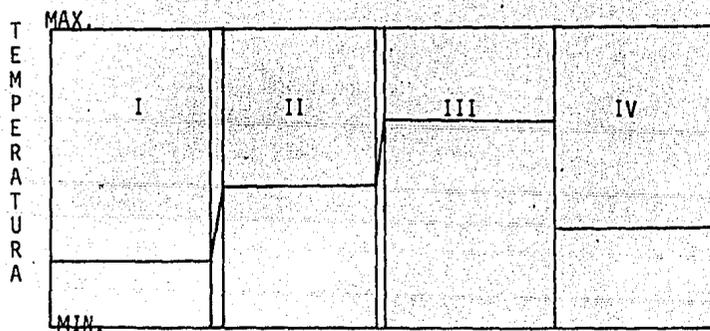
Estas zonas varían de acuerdo a las características del equipo utilizado, puesto que un quemador empleado en un proceso a alta temperatura, la flama producida no presenta las cuatro zonas, pudiendo ser amarilla ó azul, dependiendo de como se efectúe el proceso de mezclado de reactivos, de cual sea la velocidad de reacción del proceso de combustión y de que poder calorífico tenga el combustible, lo que se ve reflejado en la temperatura que alcanza el sistema.

En la figura 2.11 se ilustra una flama convencional y el perfil de temperatura que se presenta en cada una de las zonas; en la parte más interna, región I, corresponde a la zona oscura y más fría que presenta esta característica porque ahí no se lleva a cabo ninguna reacción, los gases combustibles no se queman por falta de oxígeno; la zona amarilla (zona II), corresponde a la zona luminosa donde el combustible reacciona, aunque la combustión

FIGURA 2.11  
ZONAS DE TEMPERATURA EXISTENTES  
EN UNA FLAMA CONVENCIONAL



- I ZONA OSCURA
- II ZONA AMARILLA
- III ZONA AZUL
- IV ZONA INCOLORA



ZONA DE FLAMA

no es completa, debido a que no hay suficiente cantidad de oxígeno, por lo que quedan partículas de combustible sin reaccionar. El color amarillo depende de la excitación de los electrones de la capa de valencia de los productos, que emiten una radiación que corresponde a la longitud de onda del color amarillo del espectro visible, en la zona exterior inferior (zona azul, III), es donde se obtiene la mayor temperatura de flama, debido a que la combustión es completa por la presencia de oxígeno en exceso, el color lo determinan los saltos electrónicos al generar ondas electromagnéticas que corresponden al color azul del espectro visible.

En la parte exterior superior, se queman las partículas residuales de combustible, que no se quemaron en la sección amarilla, y que al encontrarse en presencia de oxígeno reaccionan, aquí la reacción no alcanza un alto nivel de temperatura, incluso esta es menor que en las inmediaciones de la sección amarilla, por lo que las longitudes de onda que se emiten caen fuera del espectro visible, razón por la cual se considera esta zona como la zona incolora de la flama.

El hecho de que se presenten dos zonas externas de diferentes temperaturas, se explica porque en la parte azul inferior, se quema el combustible que sale del quemador con exceso de aire, lo que provoca que la combustión sea completa, con la mayor temperatura y la coloración, este combustible se agota a determinada

distancia de la base de la flama, y es por eso que solo se ve una porción inferior de este color, en la zona superior externa (IV), solo van a reaccionar las partículas que no reaccionaron en la zona amarilla.

#### B. PERFILES DE TEMPERATURA EN PELICULAS

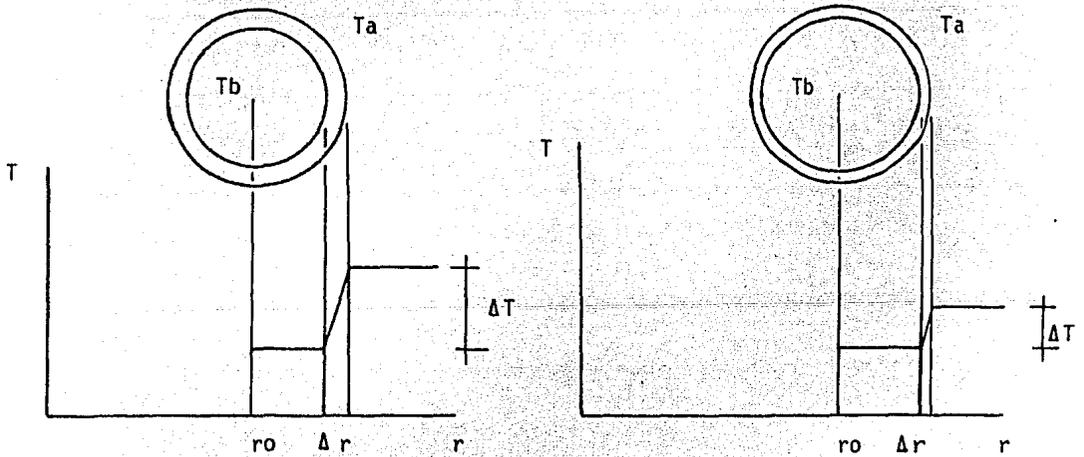
En una operación de combustión (gas-sólido), de calcinación ó una reacción sólido-gas ó sólido-sólido, así como en toda operación que involucre dos fases, existe una película interfacial en la que se presenta una diferencia entre las temperaturas de una de las fases con respecto a la otra, en este tipo de procesos es difícil saber exactamente que forma presenta el perfil de temperatura entre el sólido y el gas. Si la resistencia interfacial a la transferencia de energía es grande, se presenta una diferencia de temperatura mayor que si la resistencia fuese pequeña, tal como se observa en la figura 2.12.

El mecanismo de transferencia de calor mediante el cual la energía calorífica puede penetrar en la película interfacial es el de convección.

#### C. PERFILES DE TEMPERATURA EN SOLIDOS

El perfil de temperatura que se presenta en un sólido depende de la etapa del proceso que se lleve a cabo. En las reacciones de

FIGURA 2.12  
 POSIBLES PERFILES DE TEMPERATURA QUE  
 PUEDEN PRESENTARSE EN UNA INTERFASE  
 SOLIDO - GAS



a. RESISTENCIA INTERFACIAL  
 GRANDE A LA TRANSFERENCIA  
 DE ENERGIA

b. RESISTENCIA INTERFACIAL  
 PEQUEÑA A LA TRANSFERENCIA  
 DE ENERGIA

combustión (sólido-gas), de calcinación y sólido-sólido, el aumento de temperatura que se presenta, en la partícula es similar en todos los casos, ya que ocurren fenómenos parecidos desde el inicio del proceso hasta que se alcanza la temperatura de reacción, en donde el perfil de temperatura varía de acuerdo a, que si la reacción consume ó libera energía calorífica. En los casos mencionados en el párrafo anterior, el proceso se inicia al penetrar la energía en forma de calor a la partícula (por el mecanismo de convección), una vez vencida la resistencia de película interfacial, se presenta un aumento gradual en la temperatura del sólido (por el mecanismo de conducción), la velocidad a la que se efectúe este incremento depende de las propiedades de transporte (como la conductividad térmica), que tenga el material, así como a la diferencia de temperatura existente entre el centro del sólido y el medio que rodea a la partícula. Posteriormente, se presenta una absorción de calor sensible y latente, por parte de las impurezas volátiles que generalmente acompañan al material, al comenzar a eliminarse estas impurezas se presenta un ligero aumento de temperatura en la partícula por absorción de calor sensible, hasta que se eliminan completamente, después de esta etapa, el material continúa absorbiendo calor con lo que continúa aumentando su temperatura hasta llegar a la de reacción, a partir de la cual se puede presentar un aumento de ella, dependiendo del tipo de reacción que se efectúe (endo ó exotérmica).

En la figura 2.13 se presentan en forma cualitativa, los perfiles de temperatura en partículas sólidas, en cada una de las etapas explicadas anteriormente.

En la figura 2.14 se presenta la temperatura de una partícula con respecto al tiempo conforme el proceso transcurre.

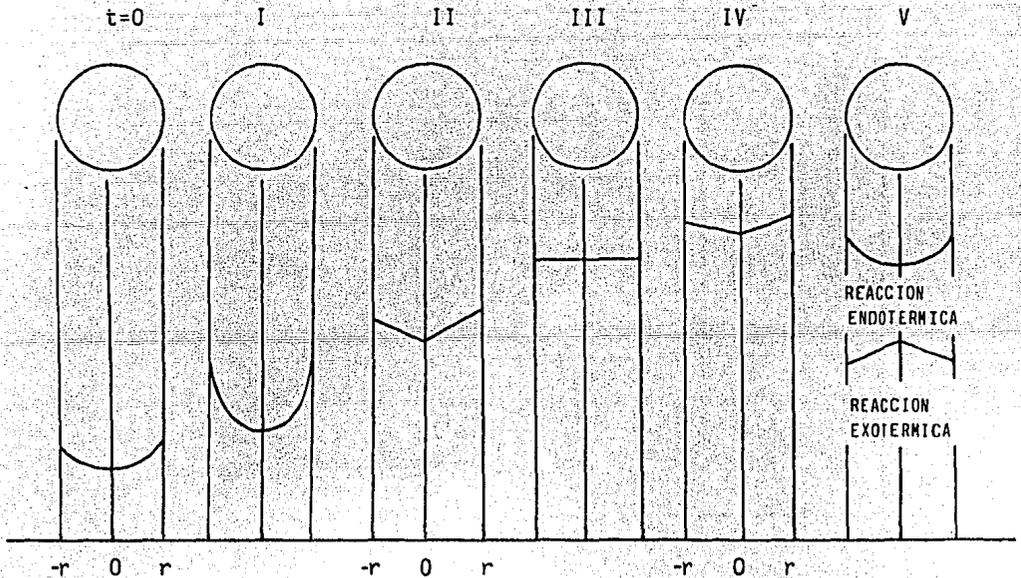
#### 2.2.7 TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa, en los procesos a alta temperatura se realiza en los sistemas sólido-sólido sólido-fluido y fluido-fluido.

En los sistemas que manejan reactivos sólidos la transferencia de masa se lleva a cabo cuando:

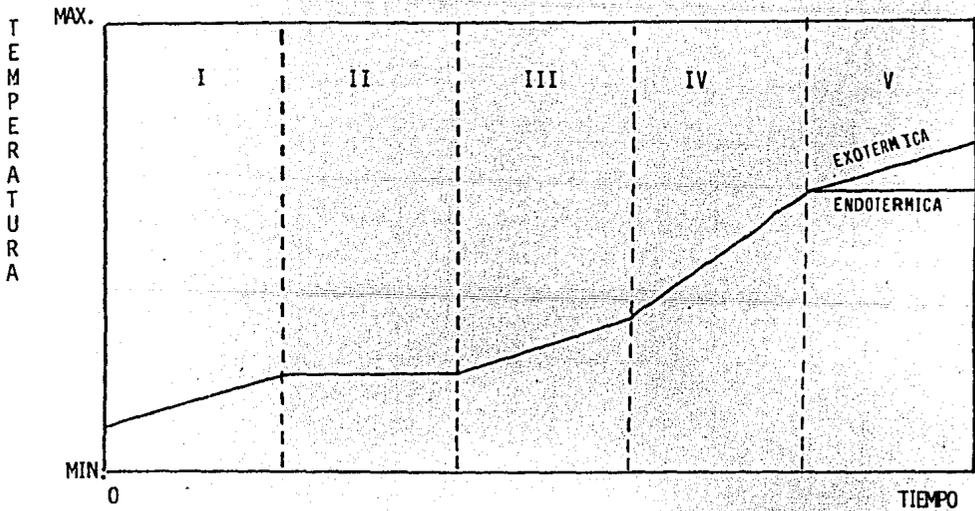
- Se presentan impurezas volátiles en el sólido y estas pasan del interior de la partícula al exterior de ésta
- Se presenta un cambio de fase de uno de los reactivos sólidos hacia el medio reactivo
- Se presenta una transferencia del reactivo de la fase gaseosa a la fase sólida, durante el transcurso de la reacción
- Se presenta la evolución de algún ó algunos productos de la reacción hacia el medio.

FIGURA 2.13  
 PERFILES DE TEMPERATURA EN LA PARTICULA  
 EN LAS DIFERENTES ETAPAS  
 DE PROCESOS CON SOLIDOS



- ETAPA I : AUMENTO DE TEMPERATURA  
 ETAPA II : ABSORCION DE CALORES LATENTES  
 ETAPA III: ELIMINACION DE VOLATILES DE BAJO PUNTO DE VOLATILIZACION  
 ETAPA IV : AUMENTO DE TEMPERATURA  
 ETAPA V : REACCION

FIGURA 2.14  
TEMPERATURAS PROMEDIO DE PARTICULAS EN  
LAS DIFERENTES ETAPAS DE UN PROCESO  
A ALTA TEMPERATURA



- ETAPA I : AUMENTO DE TEMPERATURA  
 ETAPA II : ABSORCION DE CALORES LATENTES  
 ETAPA III : ELIMINACION DE VOLATILES DE BAJO PUNTO DE VOLATILIZACION  
 ETAPA IV : AUMENTO DE TEMPERATURA  
 ETAPA V : REACCION

Como se mencionó anteriormente, la transferencia de masa se presenta en todos los procesos a alta temperatura considerados, -- ésta se lleva a cabo por el mecanismo de difusión en partículas, en sistemas sólido-gas, y por el mecanismo de convección, en sistemas fluido-fluido. En los tres casos la transferencia se debe a las diferencias de concentración y de temperatura prevalecientes en el medio.

En los casos de la transferencia de masa sólido-gas puede ó no formarse una película de líquido sobre la superficie sólida, que trae como consecuencia la formación de un sistema sólido-líquido-gas e introduce una resistencia más a la transferencia y que en algunas ocasiones se convierte en la resistencia controlante -- (31,32). Por ejemplo, en un estudio de cloración de ceniza, se notó que la disminución de la superficie de reacción se debe a la presencia de líquidos (cloruros de metales alcalinotérreos), que existen a la temperatura de reacción sobre la superficie de la partícula.

Así, la presencia de sales líquidas en la mezcla de reacción -- provee una película sobre la superficie de la partícula, introduciendo una resistencia a la transferencia de masa a la reacción global. Los gases de reacción tienen que difundirse a través de la película para llegar a la superficie de reacción; por otro lado, los vapores de productos se tienen que difundir al exterior de la película.

Así, se supone que la difusión de los gases de reacción a través de la película líquida es lenta y por lo tanto el paso controlante, lo que se ilustra en la figura 2.15.

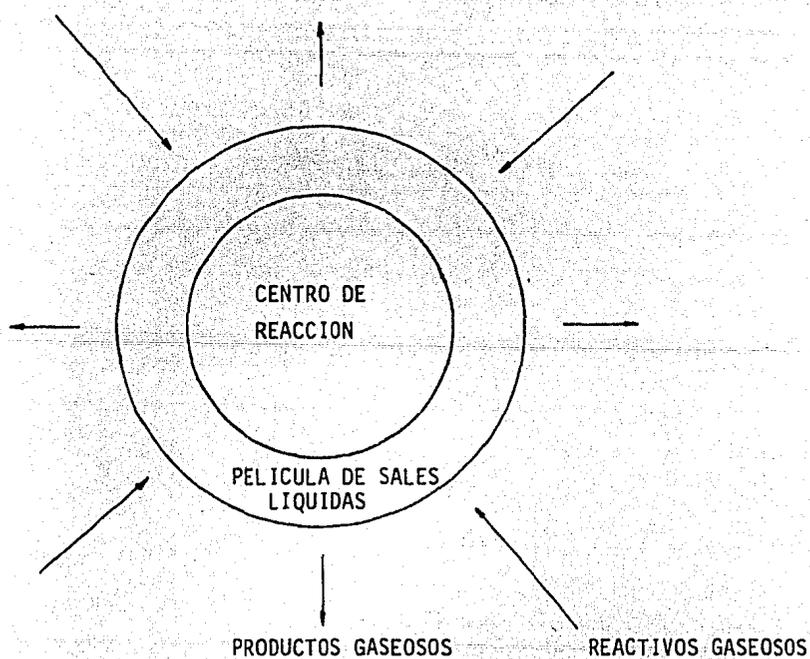
Como se mencionó anteriormente, la transferencia de masa se presenta en todos los procesos a alta temperatura considerados, -- ésta se lleva a cabo por el mecanismo de difusión en partículas, en sistemas sólido-gas, y por el mecanismo de convección, en sistemas fluido-fluido. En los tres casos la transferencia se debe a las diferencias de concentración y de temperatura prevalecientes en el medio.

En los casos de la transferencia de masa sólido-gas puede ó no formarse una película de líquido sobre la superficie sólida, que trae como consecuencia la formación de un sistema sólido-líquido-gas e introduce una resistencia más a la transferencia y que en algunas ocasiones se convierte en la resistencia controlante -- (31,32). Por ejemplo, en un estudio de cloración de ceniza, se notó que la disminución de la superficie de reacción se debe a la presencia de líquidos (cloruros de metales alcalinotérreos), que existen a la temperatura de reacción sobre la superficie de la partícula.

Así, la presencia de sales líquidas en la mezcla de reacción -- provee una película sobre la superficie de la partícula, introduciendo una resistencia a la transferencia de masa a la reacción global. Los gases de reacción tienen que difundirse a través de la película para llegar a la superficie de reacción; por otro lado, los vapores de productos se tienen que difundir al exterior de la película.

Así, se supone que la difusión de los gases de reacción a través de la película líquida es lenta y por lo tanto el paso controlante, lo que se ilustra en la figura 2.15.

FIGURA 2.15  
TRANSFERENCIA DE MASA SOLIDO-GAS CON  
FORMACION DE PELICULA LIQUIDA



### CAPITULO 3

#### DESCRIPCION GLOBAL DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS UTILIZADOS EN LAS OPERACIONES A ALTAS TEMPERATURAS

En este capítulo se hace mención a los equipos en los cuales se llevan a cabo reacciones a alta temperatura, describiendo sus características generales. - Los principales equipos son hornos de tipo convencional, tubulares, rotatorios y de lecho fluidizado, si bien, los hornos tubulares son equipos que tienen menor utilización que los otros tres tipos y por ello, se mencionan en este capítulo sin abundar más en ellos en lo que resta de este estudio. Debido a que el quemador es uno de los periféricos más importantes de los hornos, es considerado en una sección aparte.

### 3.1 CARACTERISTICAS GENERALES

En general el equipo donde se llevan a cabo operaciones a altas temperaturas se conoce con el nombre de horno, y se puede definir como aquel equipo en el que se utilizan flamas y/o productos de combustión para lograr un fin predeterminado mediante el contacto directo ó indirecto con otro material. En términos generales todo horno se conforma de los siguientes sistemas:

- Alimentación de reactivos.

Los cuales pueden ser sólidos, líquidos, gases ó suspensiones. Dicha alimentación, dependiendo de la fase en que se encuentre el reactivo, puede hacerse utilizando:

tuberías, bandas transportadoras, y de cangilones, tornillo sin fin, tolvas, etc. Estos materiales fluyen ó se mueven dentro del horno, por diferencia de densidades, diferencia de presiones, gravedad, etc.

- Alimentación de combustible ó gases de combustión.

El combustible ó los gases de combustión se alimentan dentro del reactor por diferencia de presiones.

- Reactor

El reactor es normalmente un cilindro de diferentes relaciones Longitud/Diámetro (L/D), dependiendo del fin que se persiga en el proceso y por lo tanto del tipo de horno. El reactor es también conocido como hogar del horno.

- Descarga de productos.

La descarga de productos, depende de la fase de éstos, y puede hacerse por: sobreflujo, gravedad, diferencia de presiones, etc.

- Separación gas-polvo

En algunos casos, los gases de combustión, el gas fluidizante ó el gas oxidante que abandona el reactor arrastran partículas de producto ó reactivo sin reaccionar, por lo que es necesario separar dichas partículas y almacenarlas ó recircularlas. Para esta separación se utilizan ciclones, precipitadores electrostáticos, bolsas colectoras, etc.

Los tipos de hornos en operación industrial se han clasificado de muy diferentes maneras, de entre las cuales, por ejemplo, existe la clasificación que toma en cuenta el tipo de contacto que existe entre los gases de combustión y materiales del proceso separando a los equipos en dos grandes grupos:

- Equipos de contacto directo
- Equipos de contacto indirecto

Los equipos de contacto directo se pueden describir como aquellos hornos en los cuales se usan las flamas y/o productos de combustión para lograr el resultado deseado mediante el contacto directo con otro material.

Como ejemplo de ellos se pueden incluir a los calentadores de gases y sólidos, secadores y reactores químicos, como en el proceso de obtención de ácido sulfúrico, en donde la etapa primaria consiste en la oxidación de azufre para obtener el dióxido del mismo; de igual manera en la producción del ácido nítrico, se utiliza un reactor químico de contacto directo para llevar a cabo la oxidación del amoníaco y producir óxidos de nitrógeno; otros tipos de reactores químicos de contacto directo son los calcinadores.

De igual manera, los equipos de contacto indirecto son aquellos en los que las flamas y productos de combustión no tienen ningún tipo de contacto con el material de proceso, ya que este último es aislado mediante paredes refractarias ó metálicas.

Como ejemplo de estos equipos se encuentran los vaporizadores, calentadores de agua, calderas y reactores químicos que por requerimientos del proceso deben evitar el contacto con los gases de combustión y/o de oxidación (principalmente oxígeno), específicamente se pueden considerar los reformadores que llevan a cabo reacciones endotérmicas y en algunos casos de la descomposición térmica de hidrocarburos clorados ó la producción de hidrógeno a partir de gas natural.

Se ha observado, que en todos los equipos en que se llevan a cabo reacciones a alta temperatura, se presentan cuatro zonas comunes como función de la transferencia y generación de energía que ocurre en cada una de ellas.

Estas zonas son:

- Zona I Precalentamiento de corrientes
- Zona II Generación de energía
- Zona III Sustentación de temperatura (es decir mantener la temperatura del proceso)
- Zona IV Enfriamiento de productos

En la tabla 3.1 se presenta cada una de estas zonas con su respectivo mecanismo de transferencia de energía y el grado de avance de las reacciones de proceso y de combustión.

TABLA 3.1  
ZONAS COMUNES A LOS EQUIPOS EN QUE SE  
LLEVAN A CABO REACCIONES A ALTA TEMPERATURA

	ZONA I PRECALENTA MIENTO DE CORRIENTES ENTRANTES	ZONA II GENERACION DE ENERGIA	ZONA III SUSTENTA- CION DE TEMPERATU RA	ZONA IV ENFRIAMIEN- TO DE PRO-- DUCTOS
MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR OB- SERVADO	CONDUCCION CONVECCION	RADIACION	CONVECCION RADIACION	CONVECCION CONDUCCION
NIVEL DE REAC CION DEL MATE RIAL DE PROCE SO	BAJO O NU- LO (LA -- REACCION I NICIA)	ALTO	LA REACCION SE SUSTENTA	NULO (LA - REACCION - TERMINA)
NIVEL DE REAC CION DE COM-- BUSTION	NULO	INICIA A - UN NIVEL - ALTO	NULO (LA REACCION - TERMINA)	NULO

A continuación se hace una descripción de cada una de estas zonas:

### ZONA I

Comprende el precalentamiento de las corrientes de entrada, ya sean reactivos ó combustibles y se caracteriza porque en ella puede o nó iniciarse la reacción de proceso.

Los mecanismos de transferencia de calor predominantes son la conducción y la convección puesto que al manejarse temperaturas moderadas, la radiación no es significativa.

### ZONA II

En la zona II, el combustible reacciona, generándose así la energía necesaria para llevar a cabo el proceso. esta generación de energía se lleva a cabo a temperaturas elevadas (mayores a 700°C), por lo que el mecanismo de transferencia de calor que se presenta es el de radiación predominante.

Cabe mencionar que en esta segunda zona los mecanismos de transferencia de calor por convección y conducción están presentes pero son despreciables con respecto al de radiación, además de que los productos de la combustión pueden estar o nó en contacto directo con el material a procesar.

### ZONA III

Esta tercera zona se caracteriza porque en ella se efectúan los cambios químicos sobre el material de proceso, utilizando la energía generada en la zona II. En esta zona la temperatura ha descendido con respecto a la zona II, por lo que el mecanismo de transferencia de calor por convección comienza a ser significativo, aunque no aún como el de radiación.

### ZONA IV

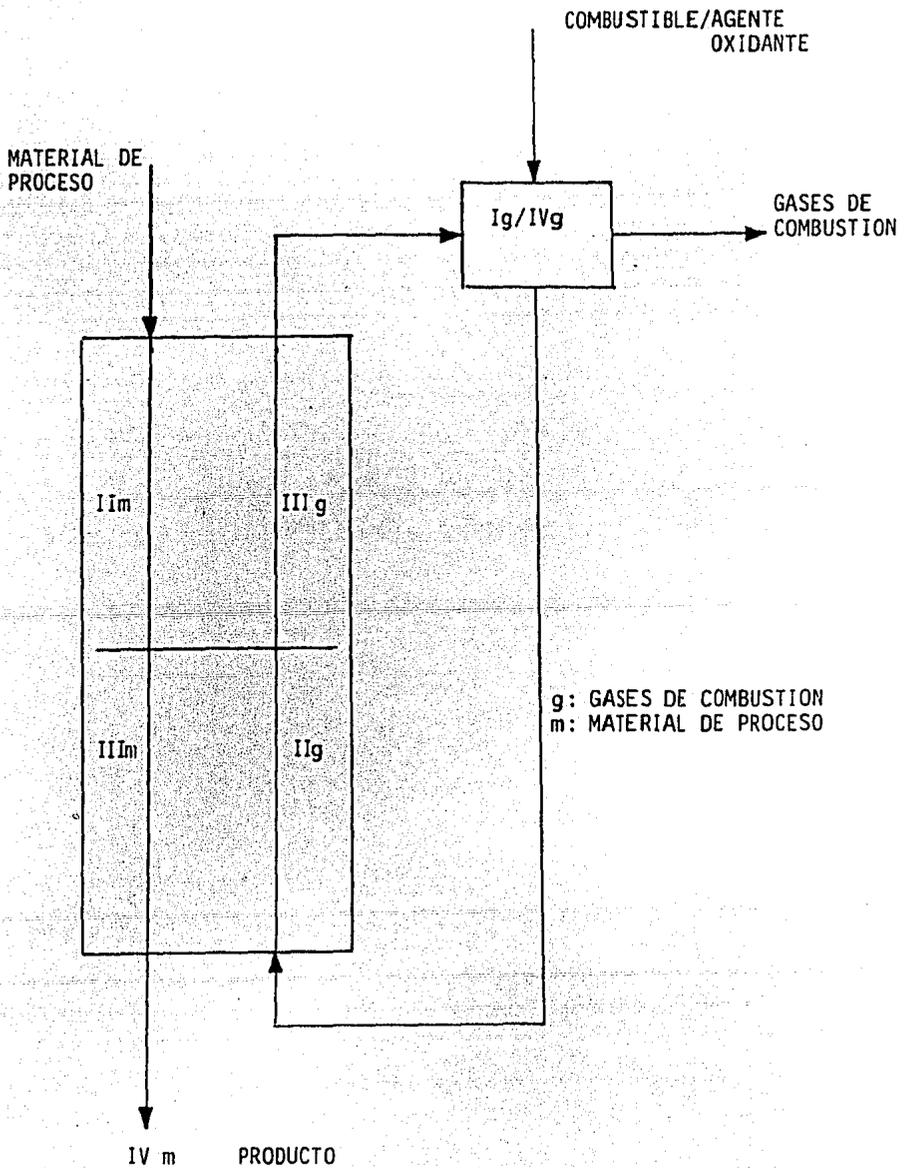
En esta cuarta zona los productos disminuyen su temperatura teniendo se la posibilidad de aprovechar el calor que desprenden para el precalentamiento de las corrientes de entrada, por lo que generalmente, -- las zonas I y IV forman la sección de recuperación de energía. En la zona IV los mecanismos de transferencia de calor que se observan son convección y conducción y se caracteriza porque en esta zona generalmente las reacciones concluyen.

Con base en las zonas definidas anteriormente, se establecen los patrones de flujo de materiales, descritos a continuación:

### PATRON I

En el patrón I, mostrado en la figura 3.1, se distingue la etapa de recuperación de calor entre corrientes de entrada a calentar (zona I)

FIGURA 3.1  
 PATRON DE FLUJO DE MATERIALES I.  
 SE PRESENTA EN HORNO CONVENCIONALES  
 Y EN HORNO DE LECHO FLUIDIZADO



y corrientes de salida a enfriar, (zona IV); además, la zona II de generación de energía se encuentra por debajo de la zona de sustentación (zona III), por lo que este patrón representa satisfactoriamente a -- los hornos convencionales y de lecho fluidizado.

#### PATRON II

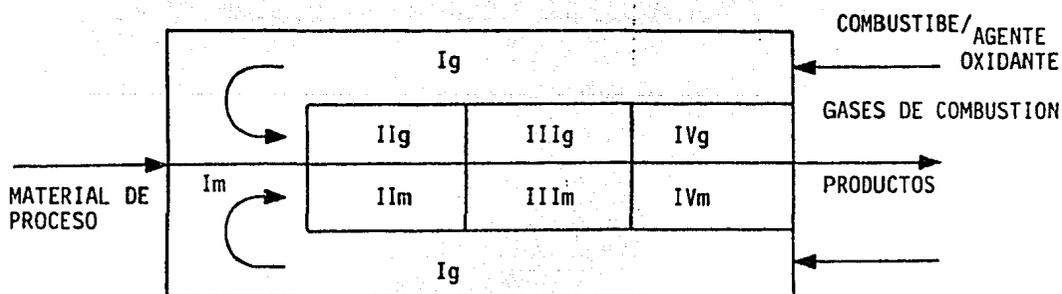
En la figura 3.2 se ilustra el patrón II, en donde se puede observar, que las corrientes de entrada reciben la energía necesaria para su ca lentamiento de las zonas de generación de energía, de sustentación y de enfriamiento, que a su vez se encuentran en serie, por lo que este patrón representa satisfactoriamente los patrones de flujo, correspon dientes a hornos de tipo tubular, rotatorio y de lecho fluidizado.

#### PATRON III

En este patrón, mostrado gráficamente en la figura 3.3, al igual que en el primero, la zona I y la zona IV, se encuentran unidas formando la sección de recuperación de calor, mientras que al existir dos líneas en contracorriente la parte superior del equipo representa la zona de generación de energía y la parte inferior la zona de sustentación.

Los equipos cuyo patrón de flujo puede ser representado por este esque ma son el horno rotatorio y el de lecho fluidizado.

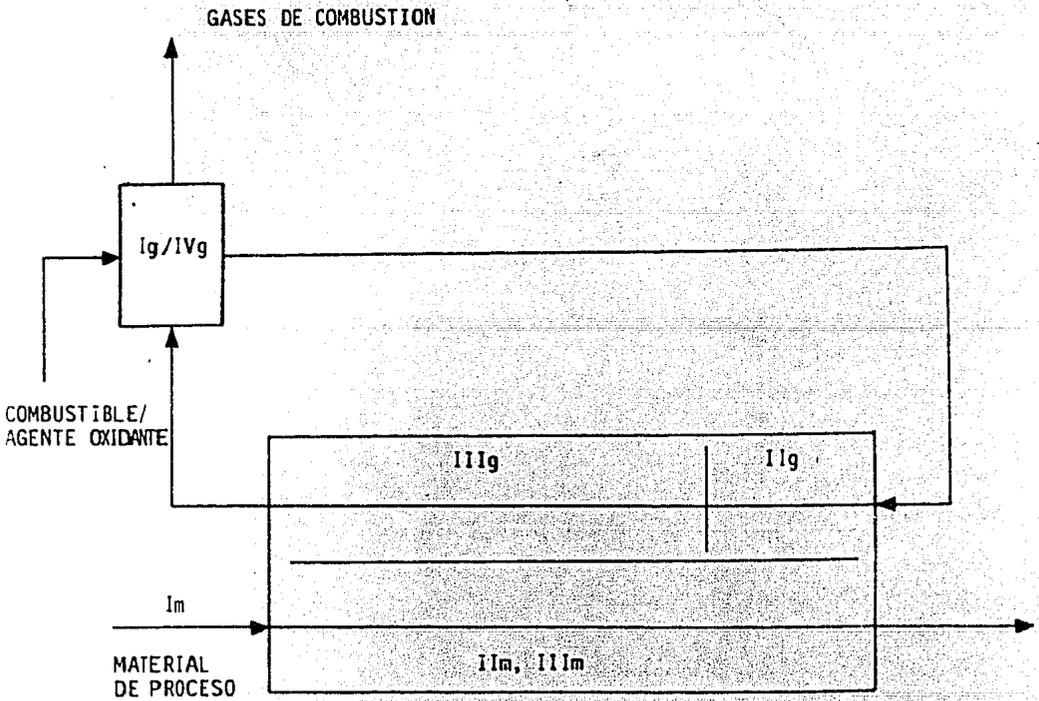
FIGURA 3.2  
 PATRON DE FLUJO DE MATERIALES II.  
 SE PRESENTA EN HORNOS TUBULARES, DE LECHO  
 FLUIDIZADO Y ROTATORIOS.



g: GASES DE COMBUSTION

m: MATERIAL DE PROCESO

FIGURA 3.3  
 PATRON DE FLUJO DE MATERIALES III.  
 PSE PRESENTA EN HORNO DE LECHO FLUIDIZADO  
 Y ROTATORIOS



g: GAS DE COMBUSTION  
 m: MATERIAL DE PROCESO

#### PATRON IV

Este último patrón se caracteriza por la inyección tangencial de las corrientes de alimentación de combustible y agente oxidante en la sección de recuperación de calor (zonas I y IV), como se presenta en la figura 3.4, y por la secuencia en serie de las zonas II y III a lo largo del equipo, por lo que este patrón puede representar a hornos rotatorios, tubulares y de lecho fluidizado.

Para fines de este trabajo, y tomando en cuenta los equipos en los que ocurre (como efecto principal), una reacción química, éstos se han clasificado de acuerdo al tipo de horno y son primordialmente:

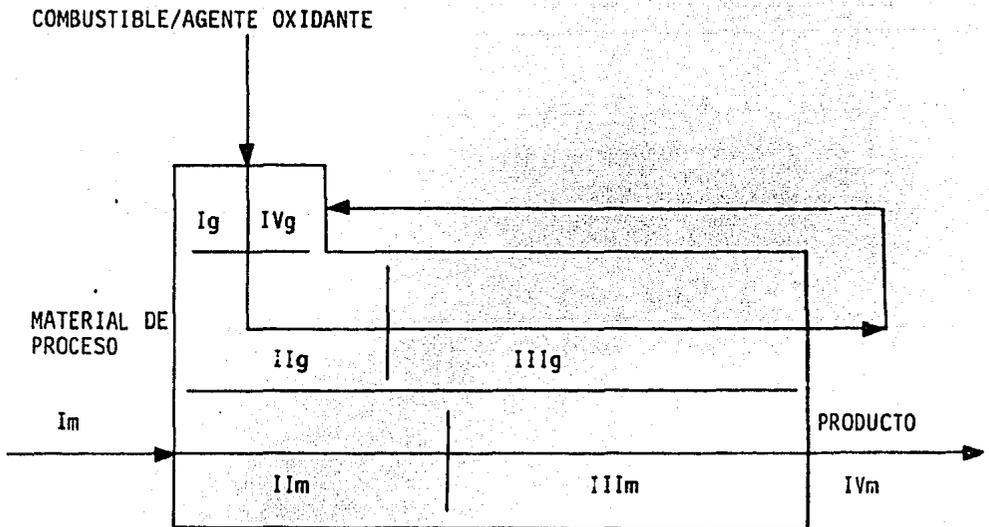
- a) Hornos convencionales
- b) Hornos tubulares
- c) Hornos rotatorios
- d) Hornos de lecho fluidizado

### 3.2 HORNOS CONVENCIONALES

Los hornos convencionales son equipos de contacto indirecto, en los cuales se transfiere la energía térmica de los gases de combustión hacia un líquido o gas de proceso a través de una pared.

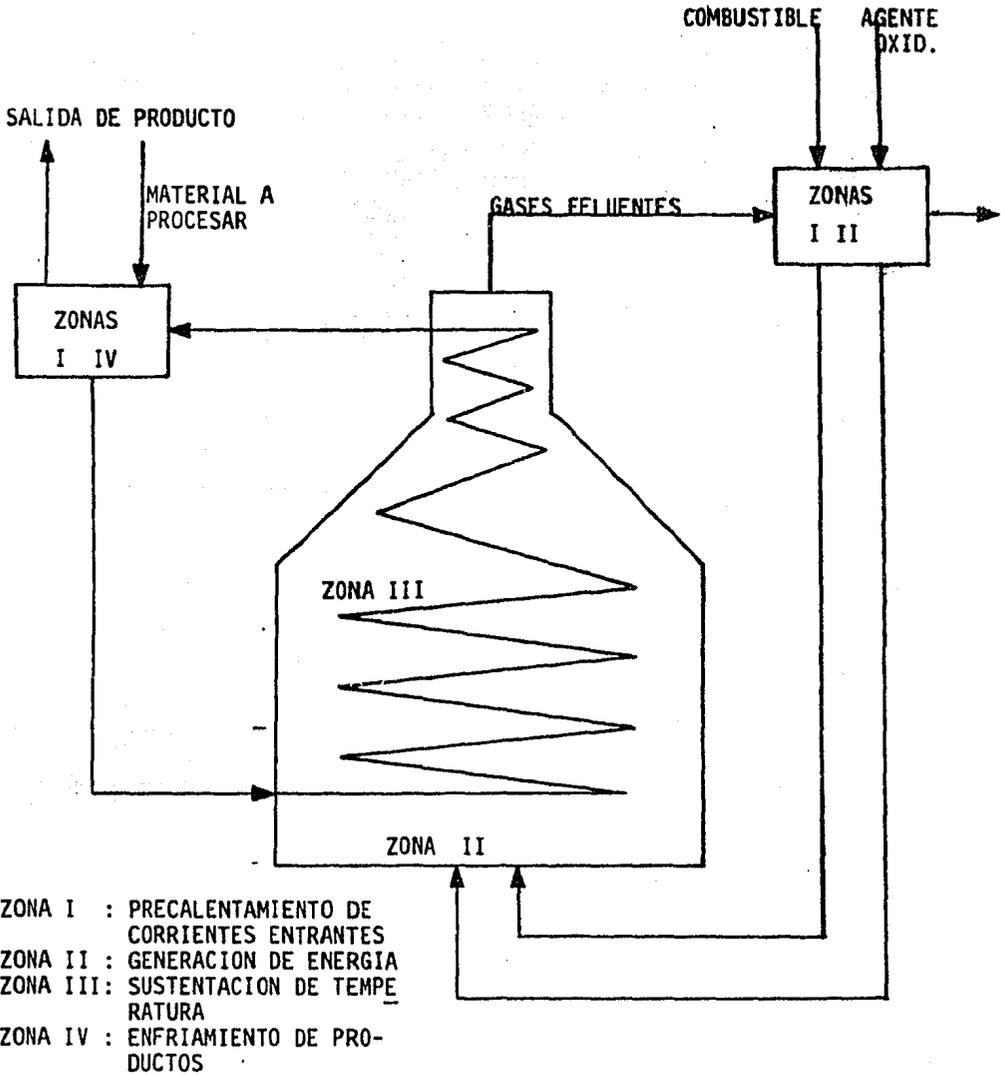
En la figura 3.5 se ilustra un esquema de un horno convencional típico, en el que se muestran las zonas explicadas anteriormente y el patrón de

FIGURA 3.4  
 PATRON DE FLUJO DE MATERIALES IV.  
 SE PRESENTA EN HORNO TUBULARES, DE  
 LECHO FLUIDIZADO Y ROTATORIOS



g: GASES DE COMBUSTION  
 m: MATERIAL DE PROCESO

FIGURA 3.5  
 ZONAS QUE SE PRESENTAN EN UN HORNO  
 CONVENCIONAL DE ACUERDO AL PATRON DE  
 FLUJO I



flujo correspondiente, los cuales son comunes para cualquier horno de este tipo.

Estos hornos pueden ser de forma cilíndrica ó rectangular (figura 3.6); constan de una zona de radiación y una de convección que tiene una serie de tubos, como se muestra en la figura 3.7, pueden diferenciarse con respecto a la posición de los internos como son quemadores en el piso ó en las paredes, como se ilustra en la figura 3.8 ó bien tubos horizontales ó verticales respecto al flujo de gases de combustión (figura 3.9).

Generalmente se emplean características especiales de diseño para evitar sobrecalentamientos, entre estas características se puede destacar, el mantener una circulación forzada del fluido que está reaccionando ó el proporcionar vapor dentro de los tubos para mantener una circulación natural adecuada.

Para evitar el choque de los gases muy calientes con las superficies de transferencia de calor y que éstas puedan sufrir daños mecánicos (por ejemplo que se venza la resistencia mecánica del material), puede diseñarse la cámara de combustión fuera del equipo, ó bien se puede alimentar aire en exceso a los quemadores dentro del equipo, para mantener bajas temperaturas de flama.

En la figura 3.10 se muestran diversos arreglos que pueden hacerse con varios hornos convencionales interconectados, así como la disposición de un cono irradiante que sirve para aprovechar el calor generado de la zona

FIGURA 3.6  
DIVERSAS FORMAS GEOMETRICAS  
DE HORNOS CONVENCIONALES

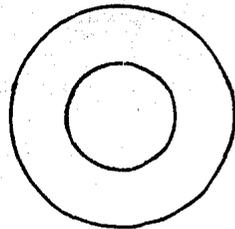
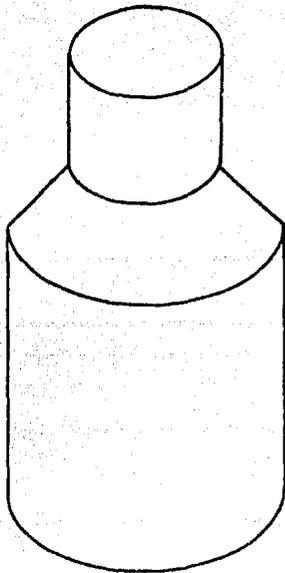
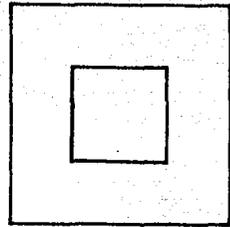
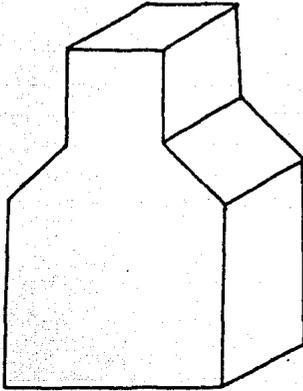


FIGURA 3.7  
COMPONENTES DE UN HORNO CONVENCIONAL

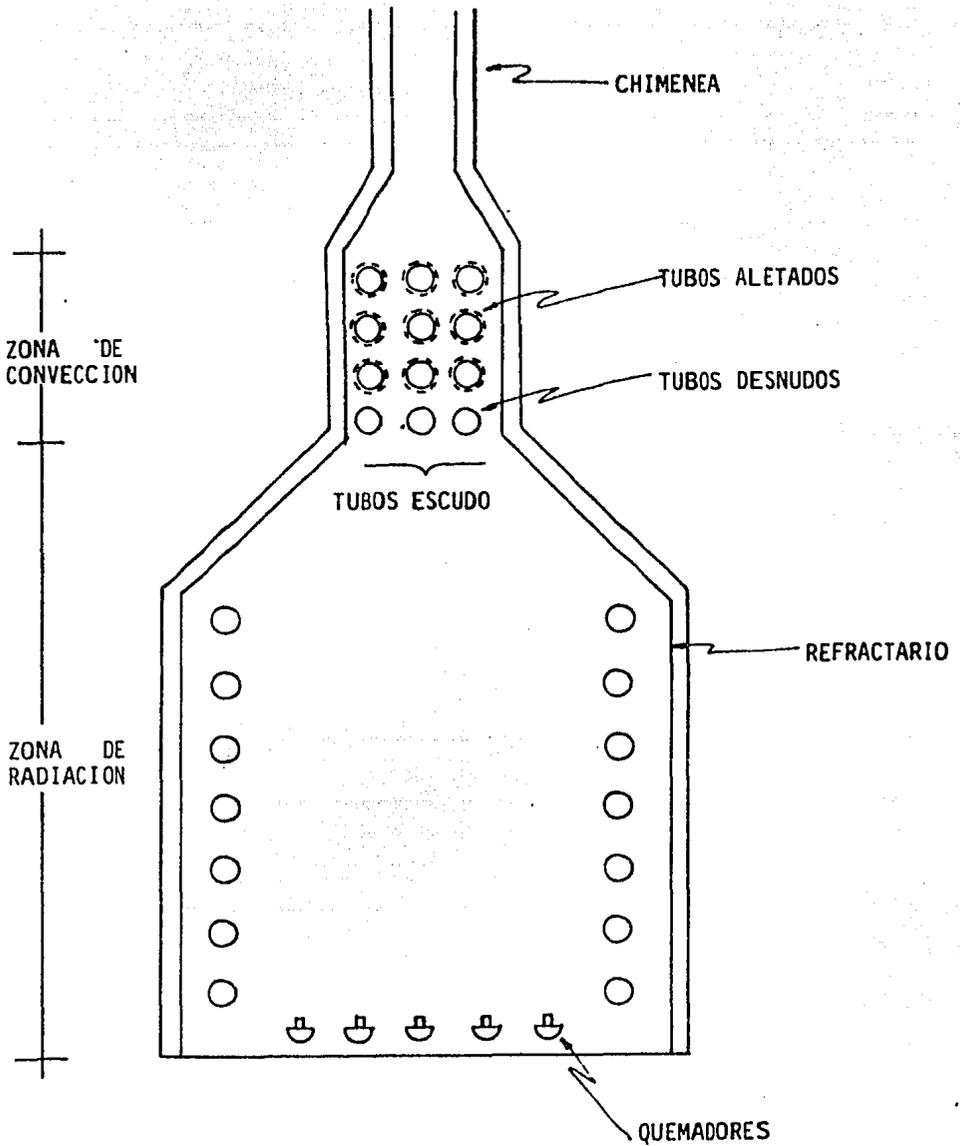
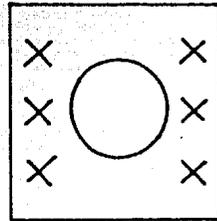
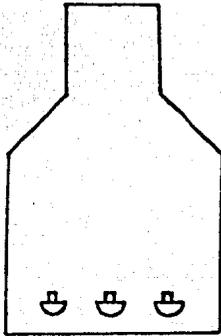
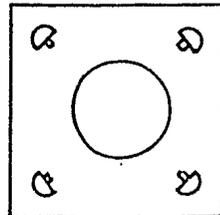
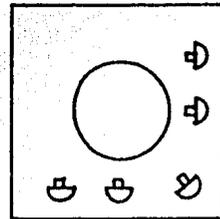
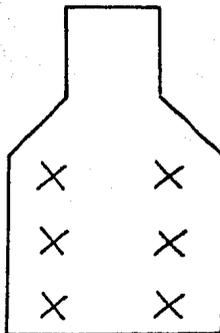


FIGURA 3.8  
 DIVERSAS COLOCACIONES DE QUEMADORES  
 EN HORNO CONVENCIONALES

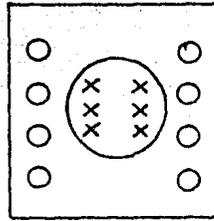
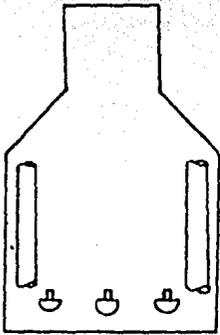


a. QUEMADORES EN EL PISO

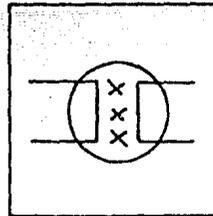
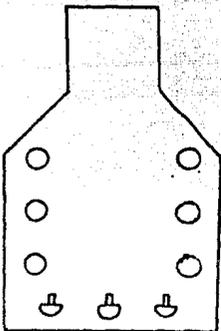


b. QUEMADORES EN PAREDES

FIGURA 3.9  
 DISPOSICION DE TUBOS EN HORNOS CONVENCIONALES

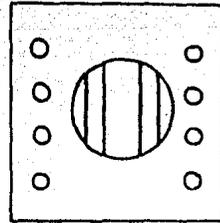
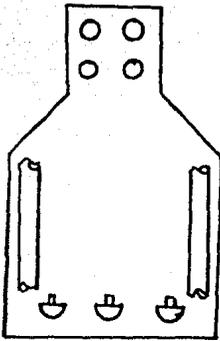


a. HORNO CON TUBOS VERTICALES CON ZONA DE RADIACION

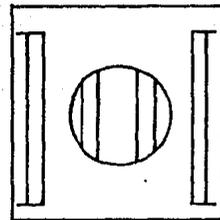
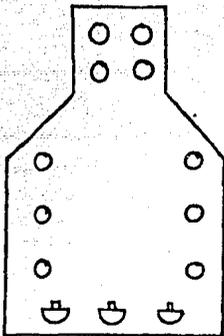


b. HORNO CON TUBOS HORIZONTALES CON ZONA DE RADIACION

FIGURA 3.9 (CONTINUACION)  
DISPOSICION DE TUBOS EN HORNOS CONVENCIONALES

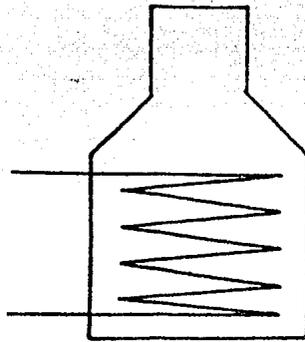


c. HORNO CON TUBOS VERTICALES CON  
ZONA DE CONVECCION Y DE RADIACION

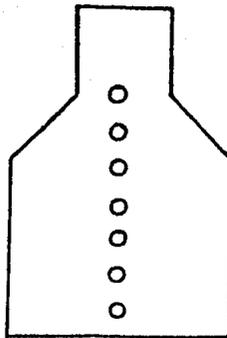


d. HORNO CON TUBOS HORIZONTALES CON  
ZONA DE CONVECCION Y DE RADIACION

FIGURA 3.9 (CONTINUACION)  
DISPOSICION DE TUBOS EN HORNOS CONVENCIONALES

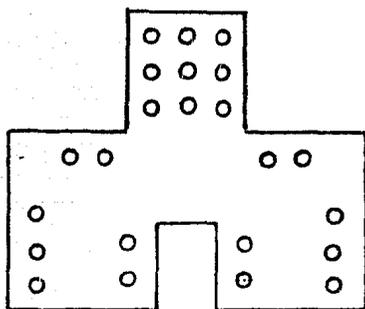


e. HORNO CON SERPENTIN HELICOIDAL

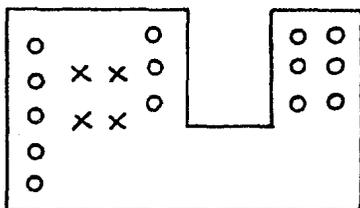


f. HORNO CON TUBOS HORIZONTALES EN LA PARTE CENTRAL DEL HORNO

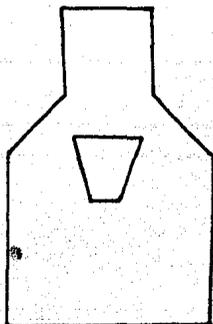
FIGURA 3.10  
 DIVERSOS ARREGLOS DE HORNOS CONVENCIONALES



a. ARREGLOS DE DOS HORNOS CUADRADOS CON TIRO Y ZONA DE CONVECCION NATURAL



b. HORNO CUADRADO CON ZONA DE CONVECCION SEPARADA



c. HORNO CONVENCIONAL CON CONO METALICO IRRADIANTE

de radiación, cuando la zona de convección no está presente.

### 3.3 HORNOS TUBULARES

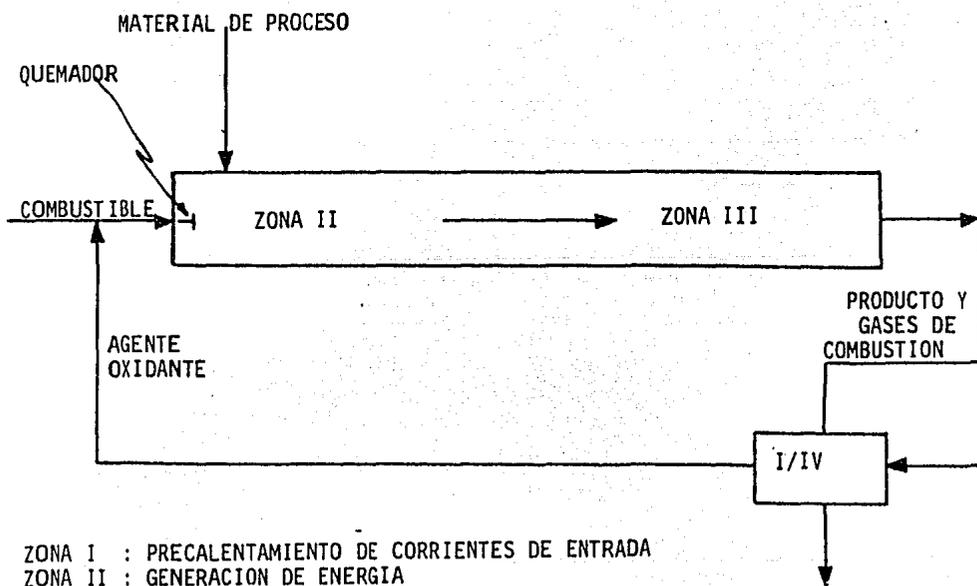
Se conoce con el nombre de horno tubular a aquel equipo, cilíndrico horizontal, donde el material principal del proceso es un fluido.

Los patrones de flujo característicos de estos equipos son los ilustrados en las figuras 3.2 y 3.4. En la figura 3.11, se presenta un esquema de horno tubular típico, en este esquema se muestran además las zonas de calentamiento de corrientes de entrada, de enfriamiento de corrientes de salida, de generación de energía y de reacción.

El calentamiento en estos hornos tubulares puede hacerse en forma directa ó indirecta. En el primer caso la pureza de los productos no es elevada debido a las impurezas de los gases de combustión que arrastran los productos. Por otro lado, si el calentamiento es indirecto, los gases de combustión circulan ya sea a contracorriente ó en paralelo a través del anulo formado entre el reactor y la tubería externa (figura 3.12), y los productos del proceso tienen un elevado grado de pureza con respecto a los del primer caso.

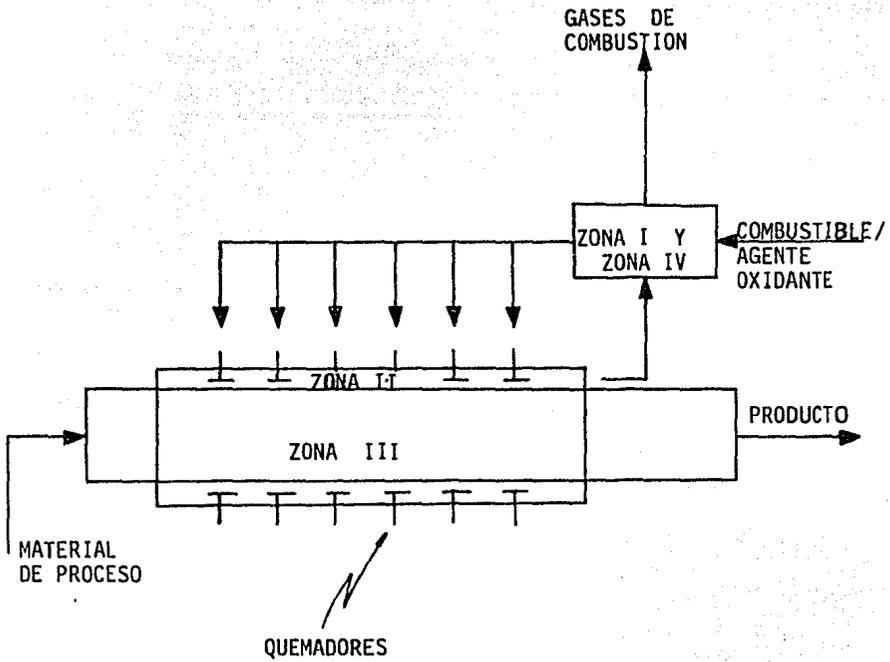
La alimentación del combustible con respecto al agente oxidante puede hacerse tangencialmente, con lo que se logra una mayor turbulencia y por lo tanto un mejor mezclado entre ellos, por lo que la reacción de generación de energía es más eficiente (figura 3.13).

FIGURA 3.11  
HORNO TUBULAR TIPICO CON  
CALENTAMIENTO DIRECTO



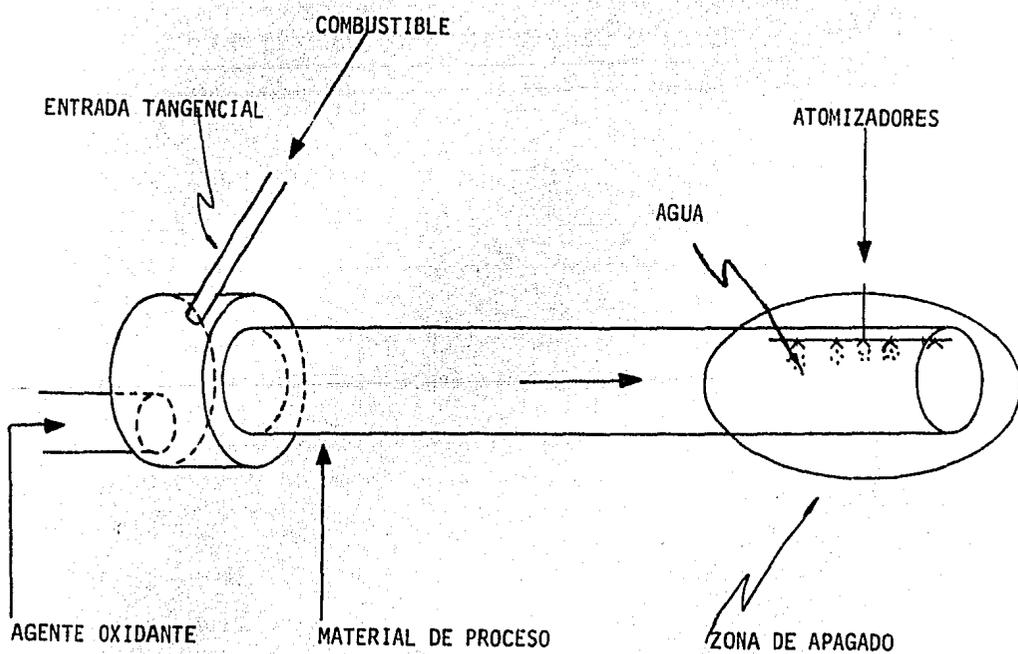
- ZONA I : PRECALENTAMIENTO DE CORRIENTES DE ENTRADA  
 ZONA II : GENERACION DE ENERGIA  
 ZONA III: SUSTENTACION DE TEMPERATURA  
 ZONA IV : ENFRIAMIENTO DE PRODUCTOS

FIGURA 312  
HORNO TUBULAR CON CALENTAMIENTO INDIRECTO



- ZONA I : PRECALENTAMIENTO DE CORRIENTES ENTRANTES
- ZONA II : GENERACION DE ENERGIA
- ZONA III: SUSTENTACION DE ENERGIA
- ZONA IV : ENFRIAMIENTO DE PRODUCTOS

FIGURA 3.13  
REACTOR TUBULAR CON ENTRADA DE COMBUSTIBLE  
TANGENCIAL Y ZONA DE EXTINCIÓN



Es común en este tipo de equipos contar con una zona de terminación de - reacción ó extinción que comprende una serie de atomizadores de agua en la salida del reactor, con lo que se reduce drásticamente la temperatura y se concluye la reacción del material de proceso (figura 3.13).

#### 3.4 HORNOS ROTATORIOS

Los hornos rotatorios son equipos utilizados para los casos en los que - el material a procesar se encuentra en forma sólida. Están formados por una parte cilíndrica dispuesta en forma inclinada (45,50), cuyo hogar - rota produciendo de esta manera movimiento al material de proceso logrando una reacción más uniforme.

En la figura 3.14, se presenta un esquema típico de este tipo de horno, las zonas vistas anteriormente y los patrones de flujo correspondiente.

Estos equipos se calientan mediante la oxidación de combustibles gaseo- sos ó líquidos, ó utilizando resistencias eléctricas. Utilizan la circulacion directa de los gases de combustión ó la transferencia de calor a través de la paredes del equipo como se muestra en la figura 3.15a y en 3.15b, por lo que se clasifican en:

- Hornos rotatorios de calentamiento indirecto
- Hornos rotatorios de calentameinto directo

FIGURA 3.14  
HORNO ROTATORIO CON CALENTAMIENTO INDIRECTO

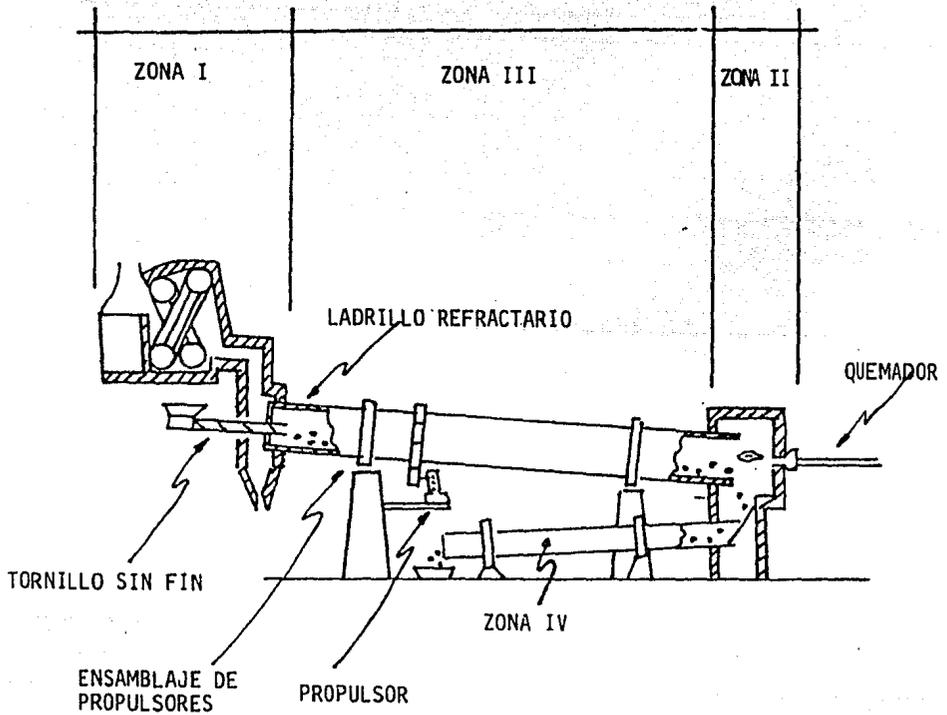
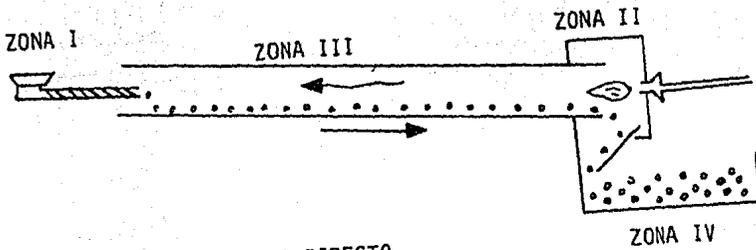
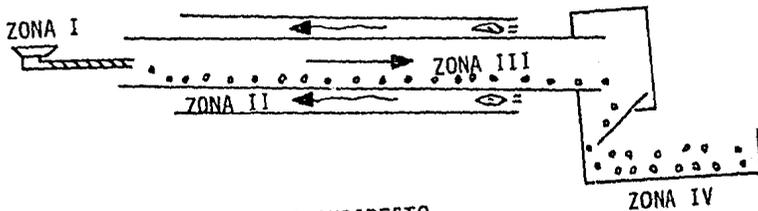


FIGURA 3.15  
TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS



a. DE CALENTAMIENTO DIRECTO

ZONA I : PRECALENTAMIENTO DE CORRIENTES ENTRANTES  
 ZONA II : GENERACION DE ENERGIA  
 ZONA III: SUSTENTACION DE ENERGIA  
 ZONA IV : ENFRIAMIENTO DE PRODUCTOS



b. DE CALENTAMIENTO INDIRECTO

### 3.4.1 HORNOS ROTATORIOS DE CALENTAMIENTO DIRECTO

Este tipo de equipo, es uno de los de mayor importancia cuando se trabaja a alta temperatura. Substituye al secador rotatorio ordinario, cuando la temperatura de pared sobrepasa a la que puede tolerar una cubierta metálica no revestida (350°-400°C para acero al carbón).

Las cubiertas ó cascos de hornos rotatorios están revestidos en parte ó en toda su longitud de ladrillos refractarios para evitar sobrecalentamiento, ocasionalmente se utilizan dos revestimientos, el que queda adherido a la cubierta es de ladrillo aislante. El aislamiento que no se utiliza con mucha frecuencia es el del exterior del casco y se deben tomar precauciones para no sobrecalentar el metal del mismo, debido a éste confinamiento.

La alimentación se introduce en el extremo superior del horno por diferentes métodos (50); en ocasiones se instalan anillos de estancamiento ó cortina de un material refractario dentro del equipo para lograr un lecho más profundo en uno ó varios puntos, cambiando así el patrón de flujo. El producto caliente se descarga en el extremo inferior del horno a tanques de enfriamiento ó dispositivos de recuperación de calor.

Existen hornos que tiene dos ó tres diferentes diámetros, a lo largo, con lo que se incrementa la eficiencia de éste, reduciendo

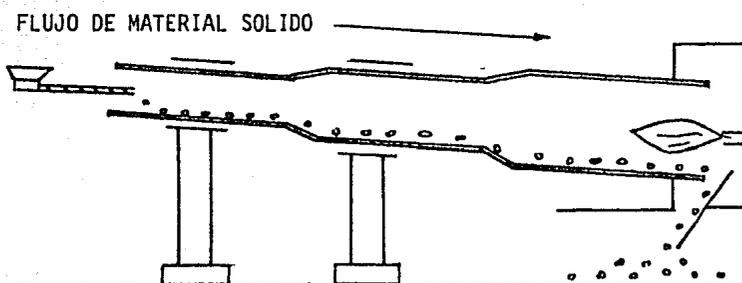
el consumo de combustible y mejorando la calidad de los productos. En la figura 3.16 se muestra un horno de este tipo. Cuando el corte transversal se amplía cerca del extremo de descarga (localización de la entrada de gas caliente), reduce la velocidad del gas y proporciona mayor retención de éste para un periodo más prolongado de contacto a altas temperaturas con el material de proceso.

El quemado de combustible se efectúa en cualquier extremo, según se desee establecer una circulación de la carga y los gases en sentido paralelo ó a contracorriente. En algunas ocasiones se mezcla un combustible sólido con la carga y se quema, al tiempo que se desplaza por el hogar del horno. Para el caso de que se utilicen combustibles líquidos ó gaseosos, el quemador, se instala directamente en uno de los extremos del horno.

Por lo común, los gases efluentes se descargan dentro de un amortiguador de polvos y humos con el fin de evitar la contaminación de la atmósfera (45).

Los dispositivos de recuperación de calor se utilizan tanto dentro del horno como fuera de él y generan un aumento en la capacidad del mismo ó bien una reducción en el consumo de combustible.

FIGURA 3.16  
HORNO ROTATORIO CON  
TRES DIFERENTES DIAMETROS



### 3.4.2 HORNOS ROTATORIOS DE CALENTAMIENTO INDIRECTO

Los hornos rotatorios de calentamiento indirecto, ya sea por lotes ó continuo, se utilizan en el tratamiento calorífico y el de secado a temperaturas más elevadas que las obtenidas en los equipos rotatorios calentados a vapor. Estos requieren un flujo mínimo de gas para purgar el cilindro que cuando maneja sólidos -- granulados, reduce la producción de polvo; además de que son adecuados para operaciones con sellos de gas y atmósferas oxidantes (42), inertes ó reductoras.

Esta unidad consta esencialmente de una retorta cilíndrica que - gira dentro de un horno estacionario con revestimiento refractario. Este último tiene una configuración tal que la oxidación - de combustible ocurre dentro de la pieza anular que va entre la retorta y el horno. El cilindro de la retorta se extiende en ambos extremos más allá de las dimensiones del horno y son las que tienen los anillos de asiento y engranaje para la rotación - del mismo . El material se alimenta continuamente en un extremo y se descarga en el opuesto. En casos en que es conveniente enfriar el producto antes de sacarlo a la atmósfera exterior, la - terminal de descarga del cilindro está provista de una extensión adicional, cuyo exterior se enfría por medios específicos, tales como rocío de agua, etcetera.

Las temperaturas de funcionamiento de los hornos de calentamiento

indirecto están limitadas solo por consideraciones de resistencia mecánica de los materiales de construcción del equipo y son del orden de 800°F para acero al carbón y 1200°F para aceros inoxidables. El uso de metales especiales llega a permitir operaciones con temperaturas del orden de 200°F.

Para evitar el deslizamiento de sólidos en el interior de la cubierta, se acostumbra soldar a la pared interna barras de elevación que corren longitudinalmente. Por lo común, estas no diseminan los sólidos, como sucede con los depósitos de calentamiento directo, sino que simplemente evitan que se deslicen, y hacen que el lecho se revuelva y exponga constantemente una cara nueva para la transferencia de calor y masa. Para evitar la formación de escamas en el interior de la cubierta, cuando se manejan sólidos adhesivos, de vez en cuando se emplea una cadena raspadora. Por ejemplo, ésta puede consistir de una serie de secciones de barras en forma de I, unidas entre sí. El uso de una cadena raspadora es una práctica común, por ejemplo para remover cenizas de sosa. Con el fin de controlar de manera precisa la retención del material de proceso cuando la tendencia de flujo es la de -- flujo tapón, se pueden adaptar aspas espirales contínuas en el interior del casco.

### 3.5 HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO

Los hornos de lecho fluidizado son equipos utilizados normalmente en el

tratamiento de materiales sólidos; en la actualidad su uso comercial se ha incrementado considerablemente (30,46,48,52,53,55,56,60), como resultado de las investigaciones efectuadas para este fin.

La forma común de este tipo de equipo es un cilindro vertical. En la figura 3.17 se presenta un esquema típico de este tipo de horno, mostrando las zonas descritas anteriormente.

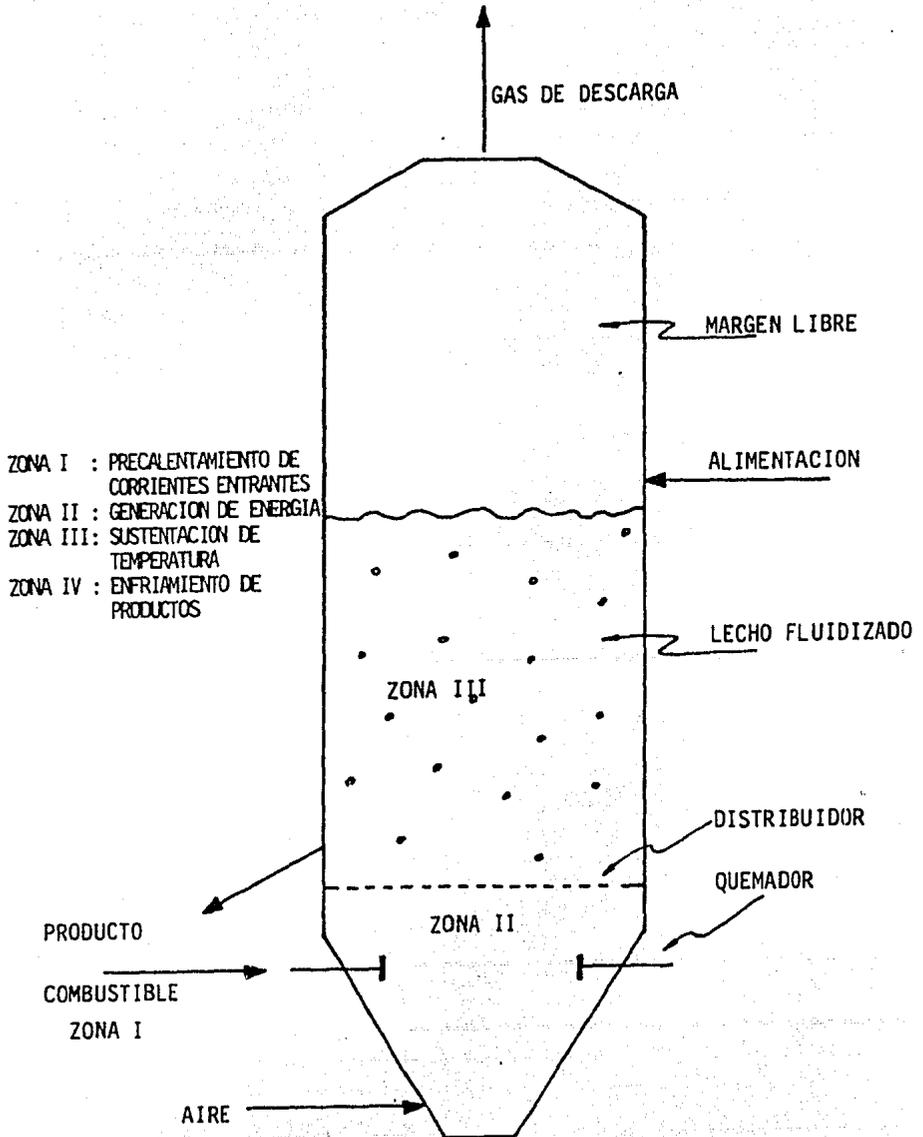
Las partes principales de que consta el horno de lecho fluidizado son:

- Reactor
- Alimentación de sólidos
- Sistema de descarga de sólidos
- Separador de polvo
- Sistema de abastecimiento de gas
- Equipo de suministro de calor

El reactor se subdivide en tres zonas que son: el lecho fluidizado, espacio de separación ó margen libre y distribuidor de gas.

En la primera parte, el gas de fluidización convierte el lecho de partículas sólidas en una masa expandida y suspendida que se asemeja a un líquido en ebullición, al igual que sucede en un depósito diseñado para hervir un líquido, el espacio dejado para la expansión vertical de los sólidos forma parte del lecho fluidizado.

FIGURA 3.17  
HORNO DE LECHO FLUIDIZADO DE CALENTAMIENTO DIRECTO



El margen libre es la distancia comprendida entre la parte superior del lecho fluidizado y el extremo del reactor.

El distribuidor de gas, es de gran importancia en el correcto funcionamiento del horno y existiendo tipos principalmente:

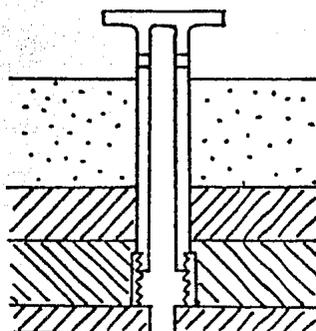
- Los utilizados en caso de que el gas de entrada tenga contenido de sólidos
- Los utilizados en caso de que el gas de entrada este libre de sólidos

Esquemas de estos distribuidores se muestran en la figura 3.18 y algunos arreglos que se utilizan normalmente se presentan en la figura 3.19.

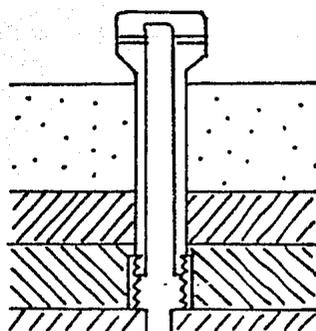
La alimentación de reactivos sólidos puede efectuarse, ya sea por la parte inferior o por la parte superior del reactor, si esta alimentación debe hacerse de manera continua, para mantener condiciones constantes de temperatura y flujo de masa (46), se pueden utilizar equipos de transporte estándar como tornillos sin fin, tolvas dosificadores, etcetera.

En la descarga de sólidos el tipo de sistema de transporte que se emplea dependiendo del tipo de material utilizado, su posible contaminación al medio ambiente, y además del tratamiento subsecuente al que se le vaya a someter. El método más simple es el vertedero de inundación; éste se utiliza solo cuando el escape del gas de fluidización no presenta ningún peligro debido a su naturaleza. Cuando existen polvos finos se hace uso

FIGURA 3.18  
ENTRADAS DE GAS EN HORNO DE LECHO FLUIDIZADO

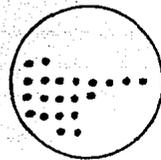
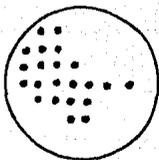
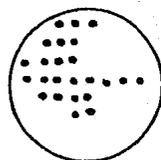
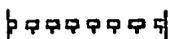
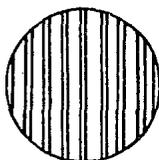
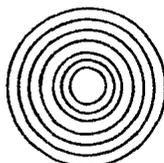
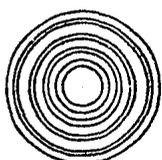


a. TIPO TABLA DE MORTERO



b. TIPO CABEZA DE BOLA

FIGURA 3.19  
 DISTRIBUIDORES DE GAS PARA GASES CON  
 SOLIDOS EN HORNOS DE LECHO FLUIDIZADO



de los separadores ciclónicos (56), los cuales constituyen el sistema de eliminación de cenizas y/o polvos; también pueden utilizarse filtros ó - separadores electrostáticos.

El suministro de calor puede ser de dos tipos: contacto directo (55), ó indirecto (56), dependiendo de los requerimientos del proceso (como son de calor, de pureza de los productos, etcetera); para el caso de contacto directo se utilizan quemadores en la parte inferior del lecho que además de proporcionar los gases de combustión proveen el medio de fluidización de los sólidos. Los hornos de lecho fluidizado se caracterizan por:

- Ser equipos que mantienen la temperatura casi constante (la temperatura varía aproximadamente en solo 10°F a lo largo del lecho fluidizado)
- Al controlar el flujo del material de fluidización, se varía fácilmente el tiempo de contacto entre el material a procesar y el de fluidización
- Tener mayor área de contacto entre el material a procesar y el material de fluidización al tener el lecho expandido, con lo que se ve aumentada la eficiencia de la reacción
- Ser de fácil manejo debido a que carecen de piezas móviles
- Existir una transferencia de energía más eficiente comparada con otros tipos de hornos debido al contacto íntimo entre los materiales de proceso y de fluidización

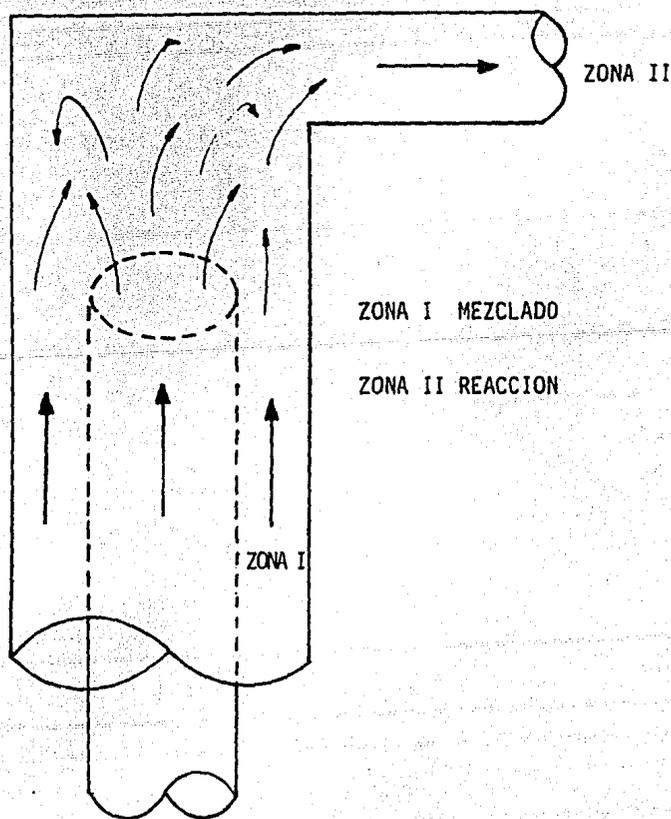
### 3.6 QUEMADORES

En general un quemador consiste de dos ductos que transportan, uno al combustible y el otro al agente oxidante, de una pared refractaria colocada frente a los ductos y de una zona de reacción más allá de la pared refractaria. Los ductos pueden descargar y mezclar al combustible-agente oxidante ya sea en la parte trasera de la pared refractaria (premezclado), o directamente a la zona de reacción (postmezclado). Pueden manejar mezclas: sólidas, líquidas o gaseosas, con algún agente oxidante. El objetivo de un quemador, es lograr un contacto lo más eficientemente posible, entre el combustible y el agente oxidante, para lo cual se han considerado dos patrones de flujo: de premezclado y postmezclado.

#### 3.6.1 QUEMADORES CON PATRON DE FLUJO DE PREMEZCLADO

Este patrón de flujo se ilustra en la figura 3.20 y tiene como característica principal, que los reactivos se mezclan previamente a la reacción, con lo que se tiene mayor rendimiento de ésta. A pesar de que se obtienen resultados bastante satisfactorios, con este tipo de operación, no es posible aplicarla en todos los casos, William (71), recomienda no mezclar los reactivos previamente, si se manejan quemadores de gran capacidad. Los quemadores que manejan este patrón de flujo, son los que utilizan combustibles líquidos y gaseosos, entre ellos destacan los de flujo de aire paralelo, que requieren de un 2.5% de exceso de aire (en comparación con los quemadores con patrón de flujo postmezclado,

FIGURA 3.20  
PATRON DE FLUJO DE PREMEZCLADO DONDE LAS  
ZONAS DE MEZCLADO Y REACCION SE SUCEDEN  
SEPARADAMENTE



que llegan a requerir un exceso de aire mínimo de 15%), estos se dividen en tres tipos principalmente, que son:

- a) Manga paralela (figura 3.21)
- b) Entrada flameada (figura 3.22)
- c) Venturi de entrada uniforme (figura 3.23)

Estos quemadores, ofrecen una alta recuperación de presión, constan de un difusor que crea un vórtice estabilizado de aire, con lo que se logra un mezclado bastante bueno con el combustible (gaseoso o líquido previamente atomizado), para su posterior combustión.

Otro ejemplo interesante de quemadores de mezclado previo, es el ilustrado en la figura 3.24, el cual tiene como característica (51), la presencia de un gas moderador de temperatura el cual fluye en una corriente paralela a las corrientes de reactivos por medio de tubos concéntricos, y presenta un fluido refrigerante que protege la boquilla del quemador.

En la figura 3.25, se ilustra un quemador que se utiliza principalmente para lechos fluidizados (59), presentándose dos opciones a la colocación de la boquilla. Tal quemador, a parte de lograr un premezclado, hace que los gases de combustión adquieran una velocidad tal, que se puedan utilizar para fluidizar el sólido de proceso.

FIGURA 3.21  
QUEMADOR DE MANGA PARALELA

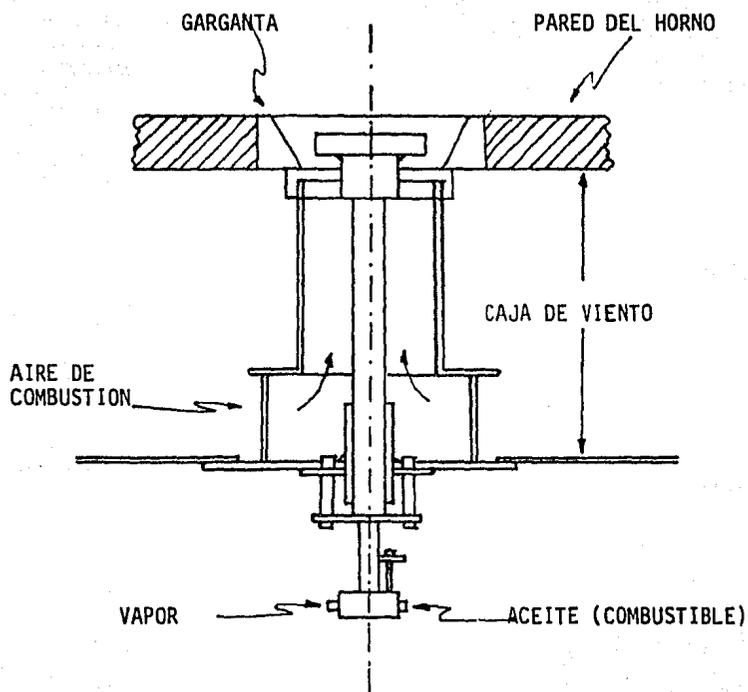


FIGURA 3.22  
QUEMADOR DE ENTRADA FLAMEADA

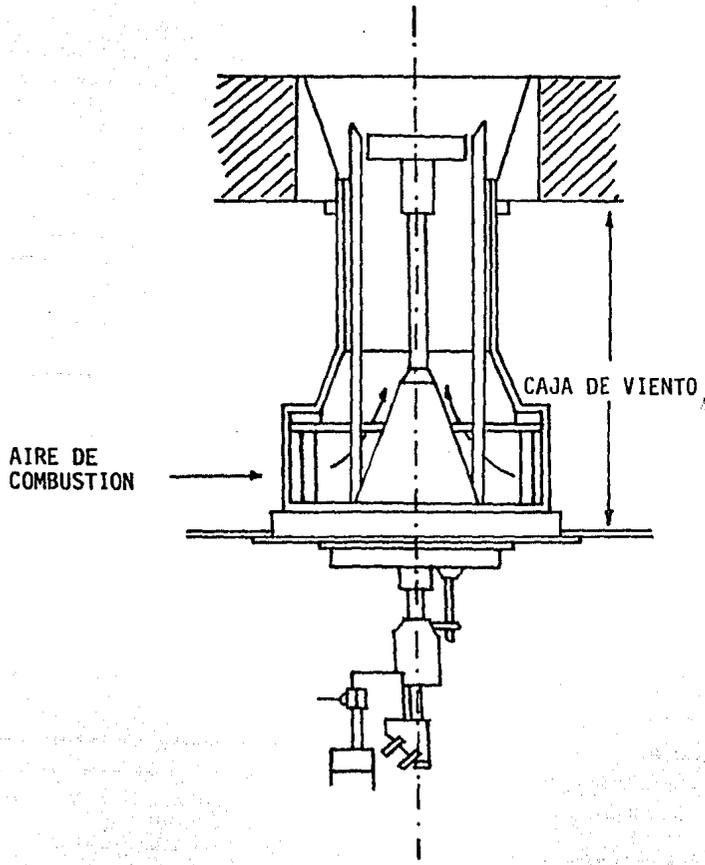


FIGURA 3.23  
QUEMADOR TIPO VENTURI DE ENTRADA UNIFORME

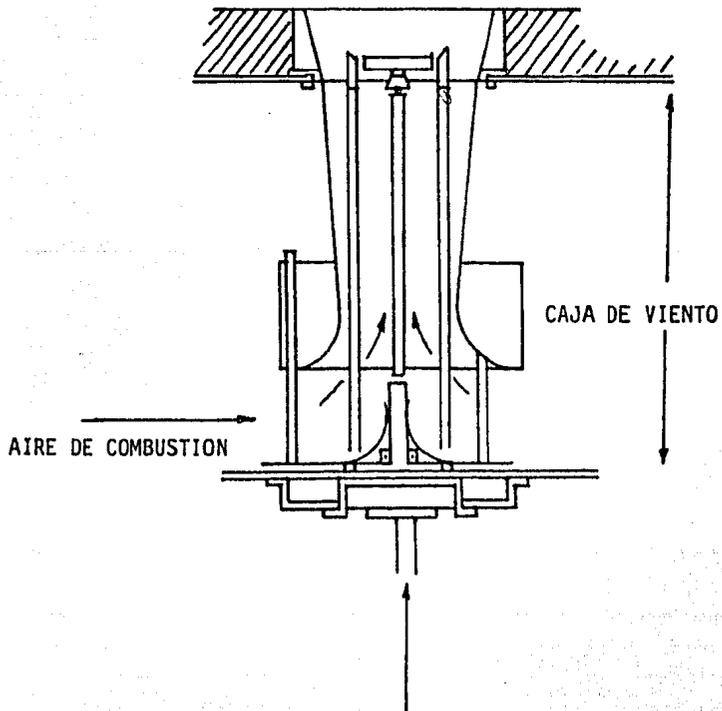
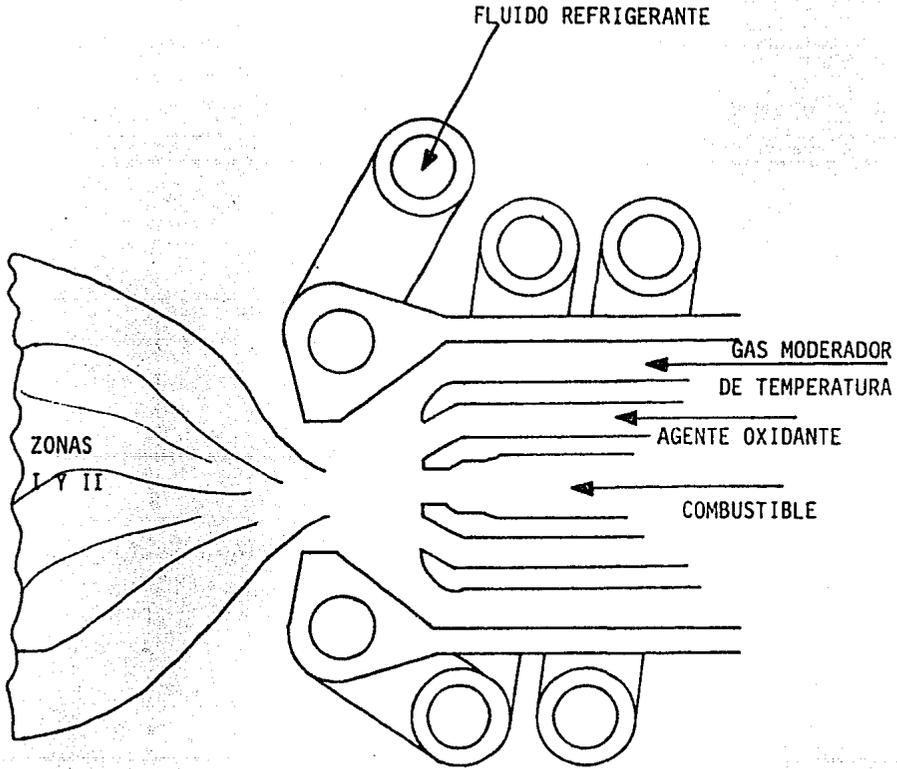
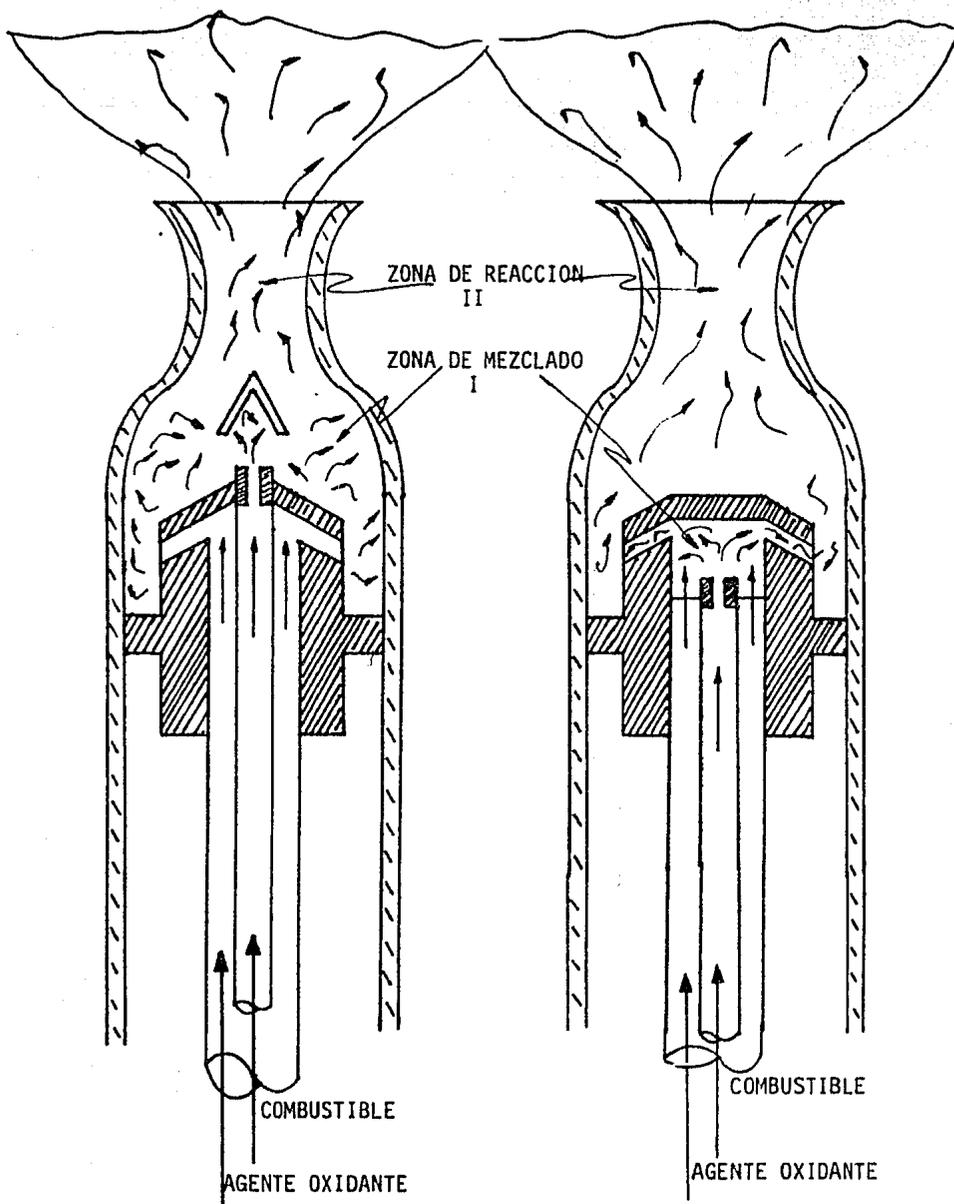


FIGURA 3.24  
QUEMADOR DE TUBOS CONCENTRICOS CON CORRIENTE  
MODERADORA DE TEMPERATURA



ZONA I MEZCLADO  
ZONA II REACCION

FIGURA 3.25  
QUEMADOR DE MEZCLADO PREVIO UTILIZADO  
EN LECHOS FLUIDIZADOS CON DOS ARREGLOS  
DE DESCARGA



3.6.2 En la figura 3.26, se ilustra el patrón de flujo de postmezclado, en el cual los materiales se mezclan entre sí en la parte externa del quemador, los quemadores que pueden presentar este tipo de operación son, los que manejan combustibles: sólidos, líquidos y gaseosos.

#### A. COMBUSTIBLES SOLIDOS

Con el combustible en fase sólida es necesario alimentar al sistema el combustible en suspensión, con el agente oxidante. El gas (aire, aire con alto contenido de oxígeno, u oxígeno puro), que forma esta suspensión, es aproximadamente del 10 al 20% del requerido para llevar a cabo la combustión y se le conoce como agente oxidante primario, en la figura 3.27, se ilustran los dos mecanismos de mezclado de reactivos que se presentan en quemadores manejan combustible sólido. Estos quemadores no han presentado innovaciones significativas desde que fueron desarrollados, ya que no es común utilizar esta forma de quemado de sólido en un horno. Recientemente (17), se han estudiado los quemadores de sólido tipo lecho fluidizado que proveen mayor eficiencia en la combustión, aparte de que eliminan el problema, de que dependiendo de las características del carbón, se elegía el tipo de quemador; se ha observado experimentalmente (17), que este tipo se utiliza con buenos resultados para cualquier tipo de carbón.

FIGURA 3.26  
PATRON DE FLUJO DE POSTMEZCLADO DONDE LAS  
ZONAS DE MEZCLADO Y REACCION SE SUCEDEN  
EN EL MISMO SITIO

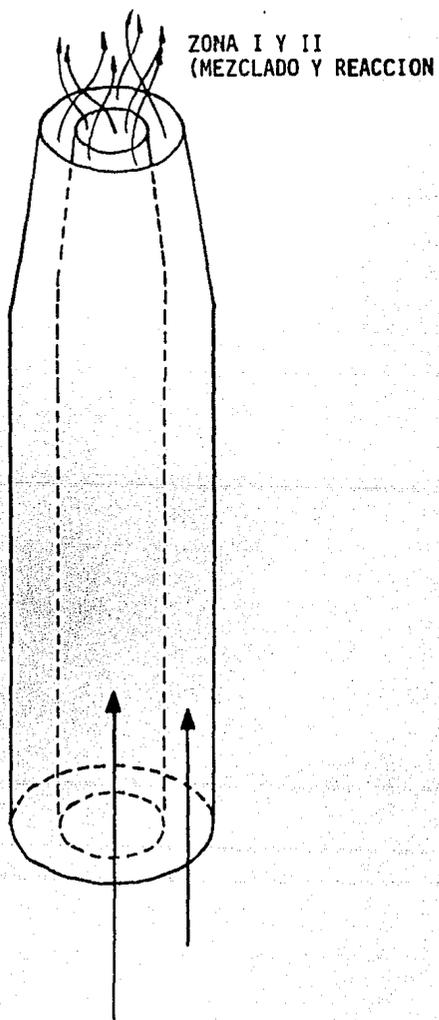
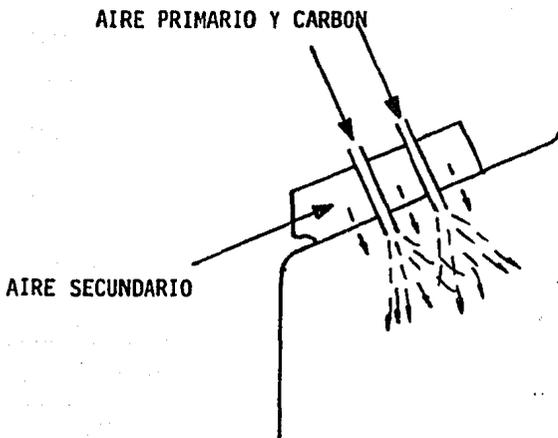
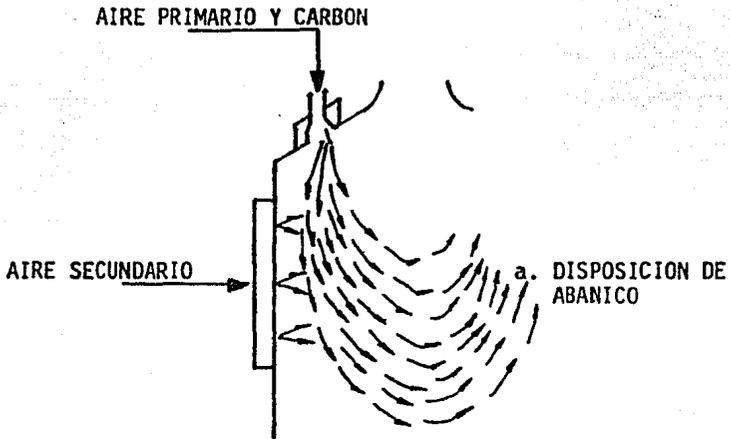


FIGURA 3.27  
FORMAS DE REALIZAR EL MEZCLADO DE REACTIVOS  
EN QUEMADORES QUE MANEJAN COMBUSTIBLE SOLIDO



b. DISPOSICION INTERVALVULAR MULTIPLE

## B. COMBUSTIBLES LIQUIDOS

De acuerdo al patrón de mezclado que se está considerando, los quemadores que utilizan líquidos, presentan problemas en cuanto a la eficiencia de la combustión, debido a un mezclado ineficiente de los reactivos ya que éste se lleva a cabo en la zona de reacción. En las figuras 3.28 y 3.29, se presentan esquemáticamente quemadores que manejan combustibles líquido y que presentan estas características de mezclado.

Las principales modificaciones que se le han hecho a este tipo son las diferentes maneras en que se trata de vaporizar la corriente del combustible, ya sea haciendo incidir una corriente de gas a alta velocidad, colocando boquillas de diferentes configuraciones a la descarga, por acompañar a la corriente de combustible con vapor ó simplemente por cambio del área transversal.

En los quemadores del patrón de postmezclado, que manejan combustibles líquidos y sólidos, no se lleva a cabo la reacción completa del combustible, por lo que los gases efluentes llevan gran cantidad de hollín, lo que puede presentar algunos problemas de emisión, dicha emisión de humo negro puede verse reducida significativamente con la inyección de vapor a la corriente de gases efluentes.

FIGURA 3.28  
QUEMADOR QUE MANEJA COMBUSTIBLE LIQUIDO  
O GASEOSO CON MEZCLADO DE LOS REACTIVOS  
FUERA DEL EQUIPO

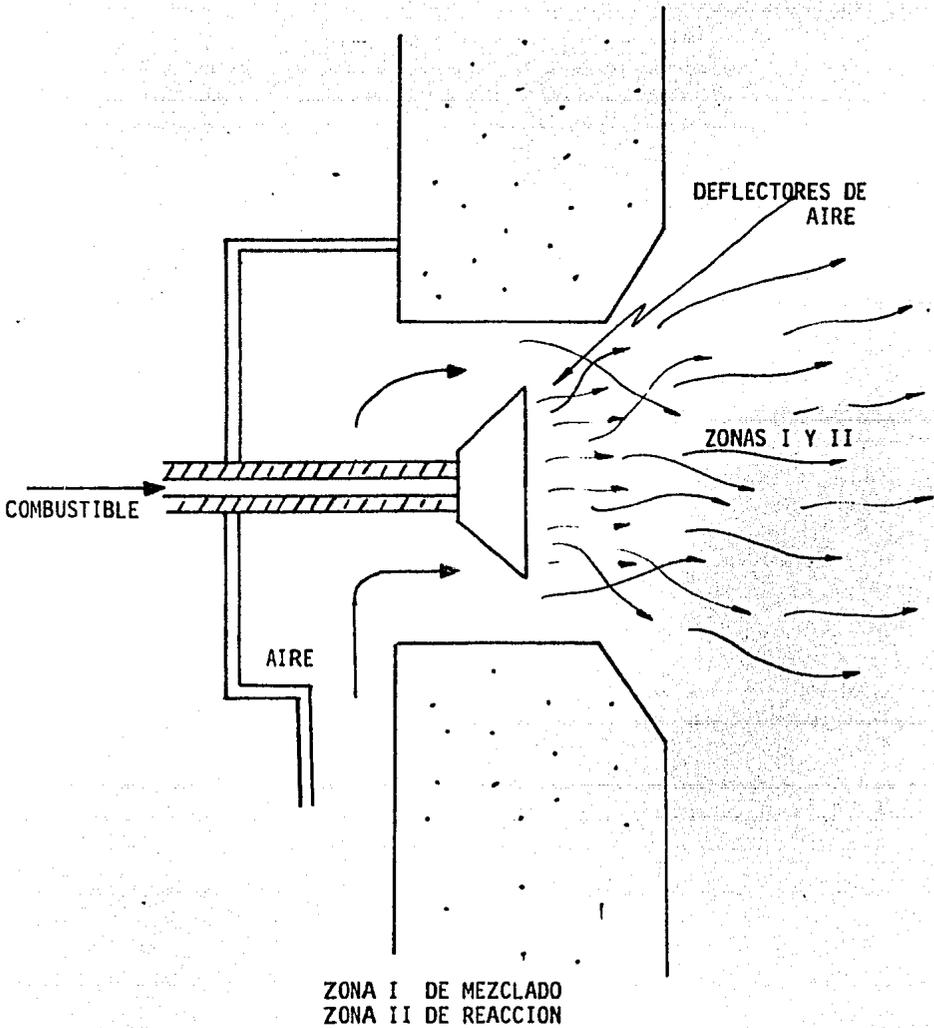
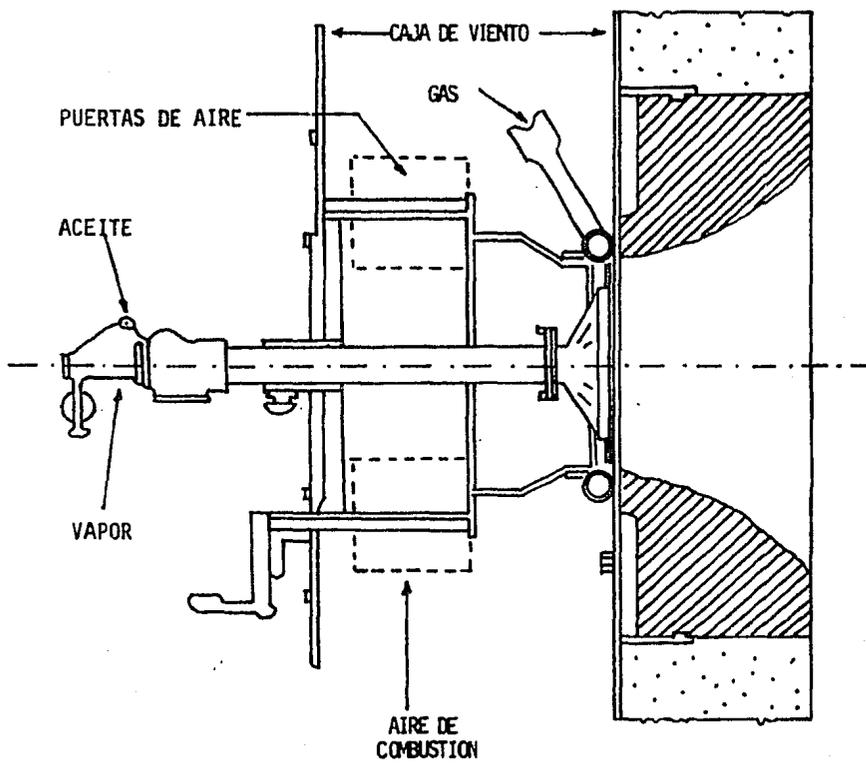


FIGURA 3.29  
QUEMADOR CONVENCIONAL CON FLUJO  
DE AIRE FORZADO



### C. COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los quemadores que manejan combustibles gaseosos, con patrón de postmezclado, presentan deficiencias en el aprovechamiento completo del poder calorífico del combustible, debido a un mezclado deficiente de los reactivos, aunque debido a que el combustible está en la misma fase que el agente oxidante, el mezclado y la reacción son más eficientes que en los casos en los que se manejan combustibles sólidos y líquidos.

Las innovaciones que se le han ido haciendo a este tipo de quemadores son principalmente: la disposición de mamparas y deflectores y la disposición de las boquillas, para incrementar la turbulencia de las corrientes de reactivos con la consecuente mejora del mezclado.

#### 3.6.3 QUEMADORES RECUPERATIVOS

Una innovación reciente en el diseño de quemadores consiste en el precalentamiento de los combustibles y/o agente oxidante en el mismo quemador, para lo que se utilizan los gases de combustión que son circulados a través del quemador antes de que salgan por la chimenea. Con este precalentamiento se aprovecha parte de la energía calorífica que aún contienen los gases de combustión y que se refleja en un mayor aprovechamiento de energéticos (29).

Estos quemadores, llamados recuperativos, se utilizan principalmente en los casos en que los combustibles son líquidos o gases. En la figura 3.30, se ilustra un quemador, en el cual los gases efluentes del horno no se eliminan por el tiro directamente, sino que pasan por el mismo quemador precalentando las corrientes de combustible y aire de combustión.

En la figura 3.31, se presenta un quemador en el que la corriente de combustible se precalienta por un paso alrededor de la flama producida por el mismo quemador.

FIGURA 3.30  
QUEMADOR TIPO RECUPERATIVO

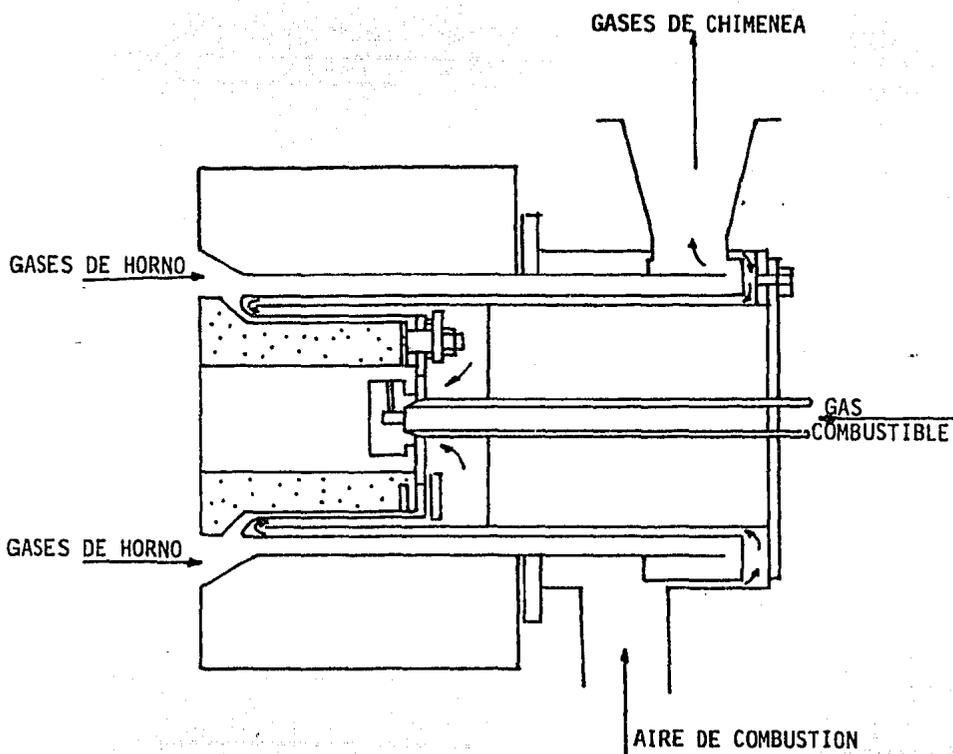
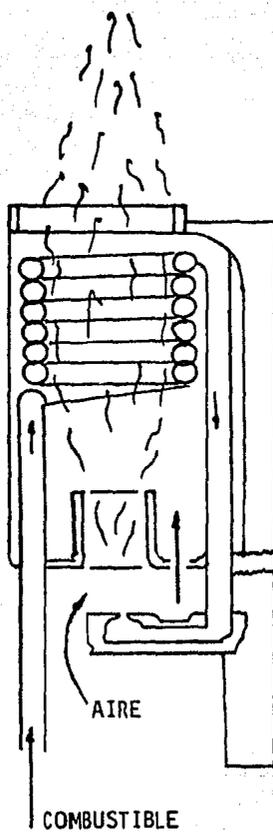


FIGURA 3.31  
QUEMADOR DE ATOMIZACION  
CON AIRE DE BAJA PRESION



## CAPITULO 4

### FENOMENOLOGIA DE EQUIPO DE PROCESOS A ALTA TEMPERATURA

Una vez presentada la fenomenología de las operaciones a altas temperaturas, así como las características principales de los equipos en los cuales se efectúan tales procesos, el presente capítulo tiene como fin indicar la fenomenología de las operaciones a altas temperaturas dentro de los equipos utilizados, de tal forma que se presenta un panorama global de lo que ocurre en todas las secciones que conforman un equipo.

## 4.1 MANEJO DE MATERIALES

Los materiales en los procesos estudiados en el presente trabajo, pueden encontrarse en forma: sólida, líquida o gaseosa, y dependiendo de ésta, varia su manejo. Así por ejemplo en alimentaciones gaseosas o líquidas, a un horno, el o los fluidos alimentados viajan a través de tubos de suministro por medio del establecimiento de una diferencial de presión, - mientras que en alimentaciones sólidas, lo más usual es el manejo por medios mecánicos (como tornillos sin fin, bandas transportadoras, etc.), o por gravedad. A continuación se explican las diferentes formas de manejo de materiales considerados para procesos a altas temperaturas.

### 4.1.1 MANEJO DE MATERIALES LIQUIDOS

El manejo de líquidos en los equipos tratados, no se presenta - con mucha frecuencia en las operaciones a alta temperatura, ya - que la mayoría de las veces se manejan gases o a sólidos principalmente. Sin embargo se manejan líquidos en los siguientes casos:

- A. Cuando el combustible utilizado se encuentra en forma líquida, y se maneja por ductos cilíndricos mediante el establecimiento de una diferencial de presión, tal que los combustibles lleguen a - la zona de combustión.
- B. Cuando se utiliza un líquido de extinción (41,48,54), de una -

reacción, el cual se maneja en ductos anulares..

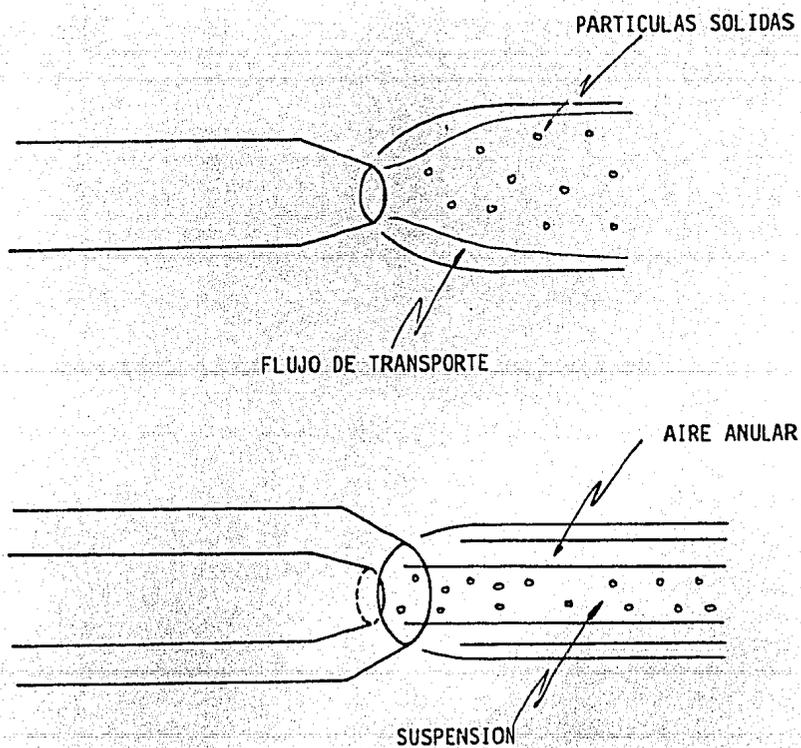
Cuando se utilizan fluidos líquidos, los ductos por los que pasan, generalmente terminan en boquillas reducidas que tienen como objetivo el de incrementar la velocidad del fluido a la descarga.

#### 4.1.2 MANEJO DE SUSPENSIONES

Otro aspecto a considerar es el manejo de suspensiones, que al igual que en el caso anterior, fluyen por los conductos de alimentación por el mecanismo de convección; generalmente cuando se maneja una suspensión, esta contiene el reactivo principal de la reacción junto con un fluido, la posibilidad de que precipite el sólido en los tubos alimentadores es remota, aunque hay que prevenirla suministrándole al fluido una presión inicial, lo suficientemente alta para que en el trayecto de la tubería se eviten al máximo las incrustaciones. Cuando la suspensión, descarga de un tubo directamente a un equipo, puede haber deposiciones en las boquillas (58), ó el sólido puede estancarse en las zonas adyacentes a la descarga, sin llegar a la zona de reacción, por lo que se considera una corriente anular que al incidir sobre la descarga ayuda a mantener el flujo en línea recta hacia la zona de reacción, tal como se ilustra en la figura 4.1.

El lecho fluidizado con transporte puede considerarse como un caso del manejo de suspensiones ya que las partículas viajan

FIGURA 4.1  
EFECTO DE CONSIDERAR Y NO LA INCIDENCIA  
DE UNA CORRIENTE ANULAR DE AIRE SOBRE  
LA ALIMENTACION DE SOLIDOS EN SUSPENSION



**suspendidas** en la corriente gaseosa al tiempo en que se lleva a cabo la reacción; de manera similar, la descarga de productos gaseosos con alto contenido de partículas se puede tratar como el manejo de una suspensión. En ambos casos la suspensión se mueve mediante el mecanismo de convección.

#### 4.1.3 MANEJO DE MATERIALES GASEOSAS

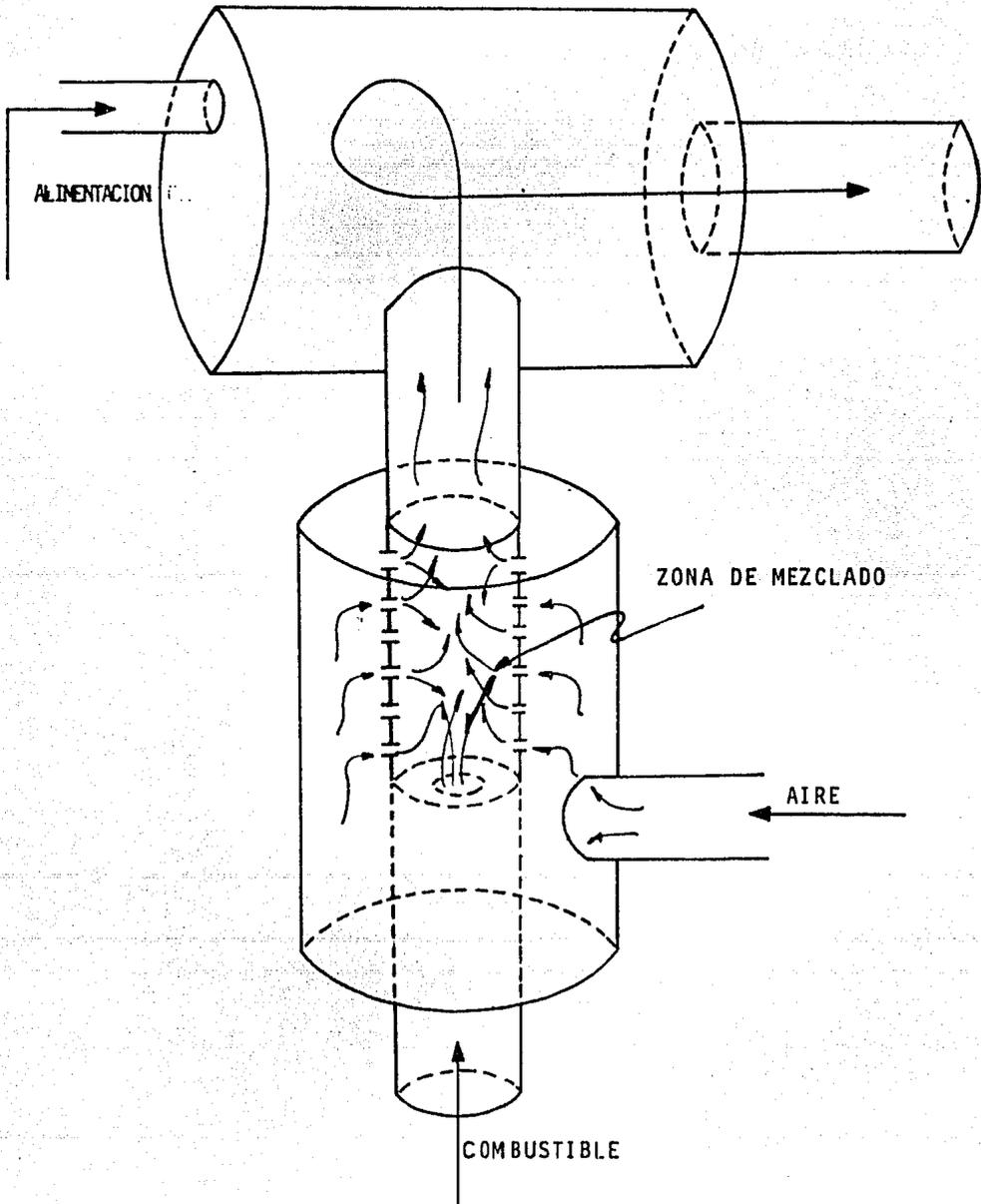
Los gases presentes en los procesos a altas temperaturas, se manejan a través de los equipos por medio del mecanismo de convección. Lo más usual es crear un tiro forzado en el cual mediante un ventilador en la parte inferior se force a que el gas fluya a través del equipo, hasta la salida del mismo; ó bien por tiro inducido colocando un soplador en la salida de los gases del equipo (45).

Además, debido a las temperaturas que tienen los gases y por su eventual enfriamiento, éstos se transportan por convección libre, a lo largo del equipo.

Las corrientes gaseosas que normalmente se presentan en un horno son: gases productos de la combustión (cuando ésta se presenta), gases de proceso y de servicio, y gases productos de la reacción.

En algunas ocasiones, es necesario mantener una temperatura baja en alguna sección del equipo, para que éste no se deteriore, por

FIGURA 4.2  
ENTRADA DE REACTIVO, CON OPTIMIZACION  
EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA  
GENERADA EN UN EQUIPO



lo que se inyecta una corriente de aire anularmente (41), como se ilustra en la figura 4.2, donde la entrada de aire en esa posición favorece la turbulencia y ayuda a mantener una temperatura razonable.

En algunos hornos rotatorios (40), donde se manejan materiales que tienden a fundirse, se inyecta una corriente de aire para evitar que se adhiera el material a la pared del horno, como se ilustra en la figura 4.3.

Un aspecto interesante del material gaseosos con sólidos en suspensión, que sale de los quemadores (en especial de los de tipo jet), en un horno, es el hecho de que el material que sale de la flama tiende a mantener su identidad y entra a un tubo imaginario, pero bien definido que lo conduce hacia afuera (tiro del horno), ocurriendo solo un pequeño mezclado entre los tubos imaginarios adyacentes, tales tubos se consideran (26), como reactores de flujo tapón, lo cual se puede representar en un esquema como el mostrado en la figura 4.4.

Con frecuencia los gases efluentes del horno, tienen todavía un alto nivel de energía el cual puede ser aprovechado. La recuperación de esta energía calorífica se efectúa haciendo pasar los gases por un sistema que permite el calentamiento de las corrientes de entrada de reactivos al equipo.

FIGURA 3.4  
UTILIZACION DE UN ACORRIENTE GASEOSA. COMO  
SERVICIO DENTRO DE UN HORNO ROTATORIO

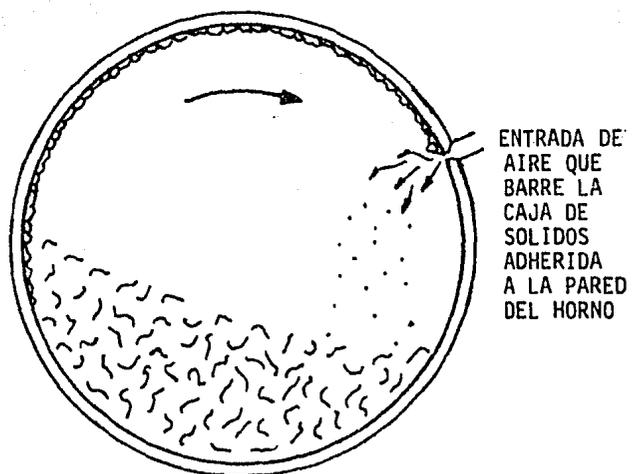
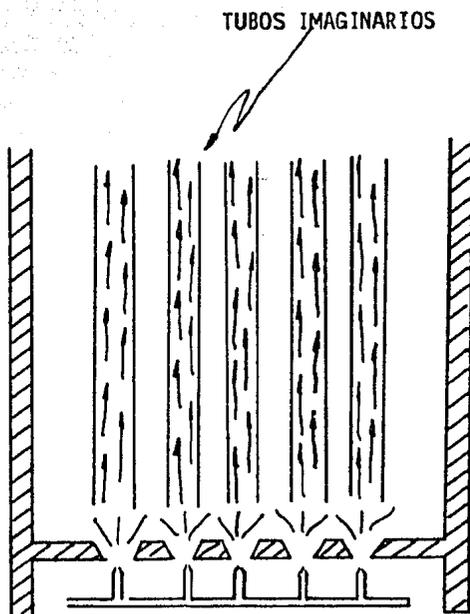


FIGURA 4.4  
MOVIMIENTO QUE PRESENTAN LAS CORRIENTES  
EFLUENTES DE QUEMADORES TIPO JET  
DE UN HORNO



#### 4.1.4 MANEJO DE MATERIALES SOLIDOS.

Para el manejo de sólidos a través de hornos se utilizan varios sistemas, tanto para la alimentación de materiales como para el movimiento de sólidos a través de las zonas de alta temperatura y para retirar los productos del proceso. Dentro de los métodos de manejo de sólidos que se presentan con mayor frecuencia se en encuentran los siguientes:

- Gravedad
- Transporte mecánico
- Transporte inducido por rotación de superficies curvas in clinadas
- Fluidización

Las características más relevantes de tales sistemas se presentan a continuación:

##### A. MANEJO DE SOLIDOS POR GRAVEDAD

El manejo de sólidos en hornos, por efecto de la gravedad, se ha ce en forma combinada con otros sistemas ya sea para disminuir ó para aumentar el efecto de la misma. Los casos más relevantes - que se presentan en los procesos que aquí se manejan lo constitu yen los hornos de lecho fluidizado y los hornos rotatorios. En los primeros, generalmente se induce la fluidización del material

en forma tal que la caída libre de los sólidos se vea retardada, aumentando de esta forma, el tiempo de residencia de los materiales dentro de la zona de fluidización. El movimiento neto de los sólidos, es en este caso, hacia abajo, de ahí que se considere este sistema como un caso de manejo de materiales por gravedad.

En el caso de los hornos rotatorios, se induce el movimiento del material por rotación de la superficie sobre la cual se mueven los sólidos y también la inclinación que generalmente tiene el equipo, permite que, por gravedad, los sólidos se desplacen en dirección descendente a través del mismo.

#### B. TRANSPORTE MECANICO DE SOLIDOS

Los sistemas de transporte mecánico de sólidos se utilizan en los equipos de alta temperatura para alimentar materiales y para retirar productos de proceso y solo en contados casos se utilizan para transportar el material a través de las zonas de alta temperatura (por ejemplo, en los hornos de banda metálica y túnel para el cocimiento de cerámicas y productos afines). Los transportadores que se utilizan para alimentar sólidos directamente al horno ó a tolvas dosificadores son: bandas, cangilones y tornillos sin fin. Las características específicas de cada sistema dependen de la configuración del equipo y del tipo de material a manejar.

### C. TRANSPORTE INDUCIDO POR ROTACION DE SUPERFICIES CURVAS INCLINADAS

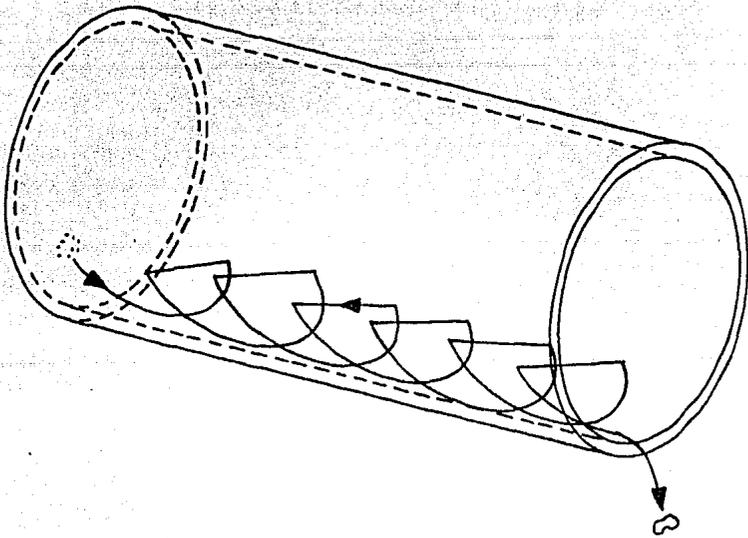
El transporte de materiales por este sistema se debe fundamentalmente a la acción de la fuerza de gravedad sobre los sólidos, como se señaló anteriormente, con ayuda de rotación de la superficie sobre la cual se desplaza el material para vencer las fuerzas de rozamiento ocasionada por la fricción de los sólidos entre sí y la fricción de la superficie curva y los sólidos. Este sistema de transporte da lugar a un perfil de movimiento dentro del equipo como el que se presenta en la figura 4.5, en donde se muestra la trayectoria que sigue una partícula de material a través del equipo.

### D. MANEJO DE SOLIDOS POR FLUIDIZACION

Desde un punto de vista estricto, se ha denominado lecho fluidizado al proceso en el cual partículas sólidas se mantienen suspendidas por un tiempo dado dentro de una corriente gaseosa. Cuando existe un movimiento neto de sólidos en una u otra dirección, se ha denominado lecho de transporte al sistema, aunque el fundamento físico, esto es, las fuerzas que actúan sobre las partículas, sea el mismo en cualquier caso.

El manejo de sólidos por fluidización en hornos ha venido desplazando a otros métodos, principalmente el de horno rotatorio, por las ventajas adicionales que presenta la fluidización en el -

FIGURA 4.5  
DESPLAZAMIENTO DE MATERIALES DENTRO DE UN HORNO  
DE PARED CIRCULAR INCLINADO CON ROTACION



proceso global. Desde el punto de vista de manejo de sólidos, - la fluidización permite controlar la dirección de flujo neto y - el tiempo de residencia de los sólidos dentro del equipo con mayor facilidad que cualquier otro sistema; esta versatilidad hace que el manejo de sólidos a través de zonas de alta temperatura - por fluidización sea aplicable a procesos continuos y a procesos intermitentes controlando simplemente el flujo volumétrico del - gas de fluidización y/o el gasto másico de los materiales sólidos que se manejan dentro del equipo.

## 4.2 CONTACTO ENTRE FASES

En los procesos a alta temperatura, se presentan dos tipos básicos de -- contacto entre fases: gas-sólido y sólido-sólido. A continuación se pre sentan los aspectos más relevantes de cada caso.

### 4.2.1 CONTACTO ENTRE FASES GAS-SOLIDO

En los en que se presentan una fase sólida y una fase gaseosa se presentan fenómenos de transferencia de masa y de energía, oca-- sionados por el contacto entre las fases y las condiciones predo minantes en los alrededores.

Uno de los aspectos más importantes en una operación, es el lo-- grar que las fases estén en contacto el tiempo suficiente para - lograr las condiciones necesarias para que la reacción se lleve

a cabo, motivo por el cual los equipos han ido mejorándose tomando en cuenta este punto.

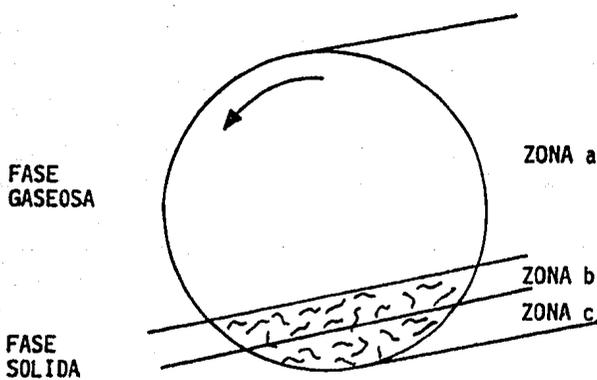
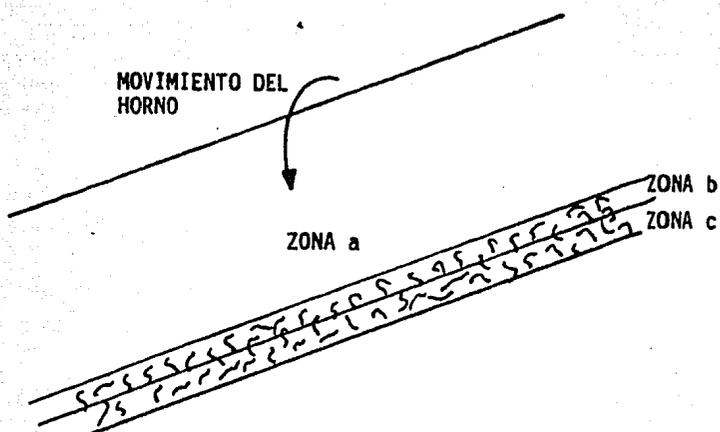
A continuación se presentan los aspectos más relevantes del contacto gas-sólido en hornos tipo horizontal (rotatorio) y en vertical (de lecho fluidizado). No se hace mención a los hornos convencionales debido a que en éstos, las fases no se encuentran en contacto directo.

#### A. HORNO TIPO HORIZONTAL (ROTATORIO)

En este tipo de horno, como se muestra en la figura 4.6 el contacto entre la fase gaseosa y la fase sólida, principalmente se efectúa entre las zonas (a) y (b), que es donde se presenta la máxima transferencia de energía de la fase gaseosa a la sólida. Por tal motivo, para que toda la fase sólida (tanto la zona (b), como la zona (c)), alcance la temperatura necesaria para que se efectúe la reacción a lo largo del equipo, éste tiene un movimiento rotatorio como se muestra en la figura 4.6, a fin de que en cierto período, los sólidos que se encuentran en la (c), pasen a la zona (b), y entren en contacto con el gas de alta temperatura, a fin de que se efectúe la transferencia de masa ó energía en forma satisfactoria.

Uno de los puntos que se deben cuidar, para que el contacto entre la fase gaseosa y toda la fase sólida sea lo más eficiente -

FIGURA 4.6  
CONTACTO ENTRE FASES SOLIDA Y GASEOSA  
EN UN HORNO VERTICAL TIPO ROTATORIO



posible, es el tamaño de los sólidos alimentados. Esto es, entre más uniforme sea el tamaño del sólido alimentado, mayor eficiencia se tiene en cuanto al contacto entre fases, debido a que un alto porcentaje de los sólidos, en un momento dado, estarán en la zona (b) dentro del horno, mientras que si existen grandes diferencias en el tamaño del sólido alimentado, se tiende a formar capas de sólidos de tamaños promedios de sólido, haciendo que -- las capas de éstos, que se forman abajo de la zona (b) no lleguen a estar en contacto con el gas dentro del equipo.

En los hornos tipo rotatorio, existen dos tipos de operaciones, que son: en corriente paralela y a contracorriente. En ambas operaciones, el contacto entre fases, se lleva a cabo entre las zonas (a) y (b), sin embargo, se utiliza más la operación a contracorriente, debido a que la mayoría de los procesos a alta temperatura, requieren de un calentamiento gradual del sólido de proceso para prevenir posibles cambios que pueden efectuarse en las propiedades mecánicas del sólido. Y se tiene mejor recuperación de energía.

#### B. HORNO TIPO VERTICAL (LECHO FLUIDIZADO)

Los estudios orientados a lograr un mejor contacto entre las fases sólida y gaseosa, dieron como resultado el concepto de lecho fluidizado, el cual poco a poco se está introduciendo en los procesos a altas temperaturas.

En los hornos de lecho fluidizado, la fase sólida se encuentra en forma dispersa en un medio gaseoso (fase gaseosa), con lo cual el área de contacto de la fase sólida se incrementa casi a su máximo valor posible, mejorándose de esta forma la transferencia de masa o energía entre las dos fases presentes, obteniéndose las condiciones necesarias para que la reacción se lleve a cabo en un menor tiempo. Esto hace que la longitud del horno se vea reducida, en uno del tipo vertical con respecto a uno horizontal.

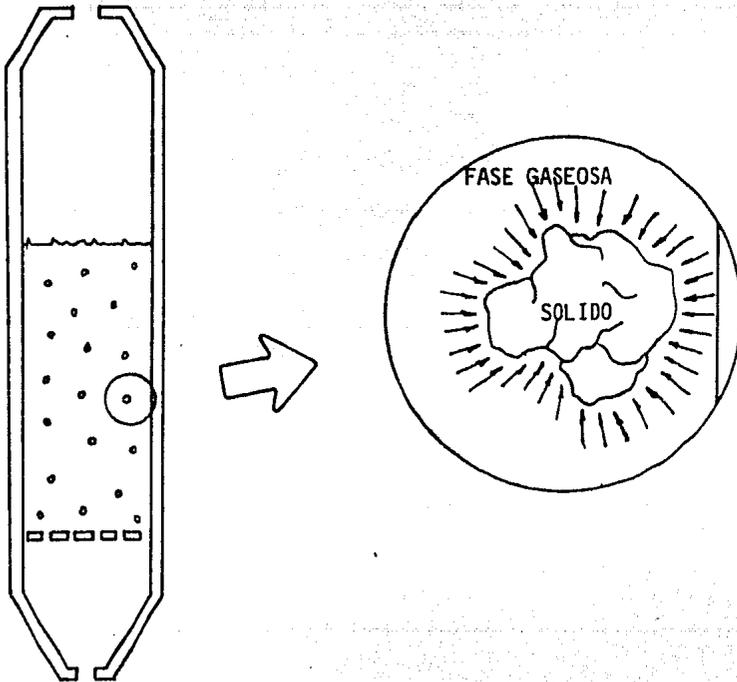
En la figura 4.7 se muestra como se mejora el contacto entre las fases presentes en un horno de lecho fluidizado, y en forma especial, se muestra el contacto entre una partícula sólida y la fase gaseosa que lo rodea.

En los hornos de lecho fluidizado, existen tres tipos de operaciones: de lecho estático (propriadamente fluidizado), y de lecho de transporte, el cual a su vez puede ser a corriente paralela o a contracorriente.

La operación de lecho estático, se utiliza, cuando el contacto entre las dos fases debe ser de periodos largos para alcanzar las condiciones necesarias para la reacción.

Las operaciones de lecho de transporte, se utilizan para tiempos

FIGURA 4.7  
CONTACTO ENTRE LA FASE GASEOSA Y LA FASE  
SOLIDA EN UN HORNO VERTICAL DEL  
TIPO LECHO FLUIDIZADO.



de contacto ó de residencia relativamente cortos, y el patrón a contracorriente ó en corriente paralela, depende de las características de cada proceso. Esto es, en todo lecho fluidizado la fase gaseosa (que contiene la mayoría de las veces la energía calorífica necesaria para que se obtengan las condiciones de reacción), entra al horno por la parte inferior de éste, y sale por la parte superior del mismo. De ahí que si el proceso requiere de que la fase sólida sea calentada paulatinamente hasta llegar a la temperatura de reacción, la operación más utilizada es la de contracorriente en donde el sólido penetra al equipo por la parte superior de éste y mediante gravedad va descendiendo e incrementando su temperatura paulatinamente.

La operación a corriente paralela, se utiliza cuando se requiere que el sólido que entra al equipo alcance una temperatura muy elevada al inicio de la operación, lográndose ésto mediante el contacto de los gases calientes en la entrada del equipo con sólido frío originalmente.

#### 4.2.2 CONTACTO ENTRE FASES SOLIDO-SOLIDO

El contacto entre fases sólidas adquiere importancia cuando, en un proceso a alta temperatura, los reactivos son sólidos, y por lo tanto para que la reacción se lleve a cabo deben de estar los distintos sólidos que toman parte en la reacción, en contacto.

Al igual que en el caso anterior, en este contacto se debe lograr que la transferencia de masa y de energía, primordialmente, se den en forma satisfactoria, a fin de lograr el medio adecuado para que la reacción tome lugar.

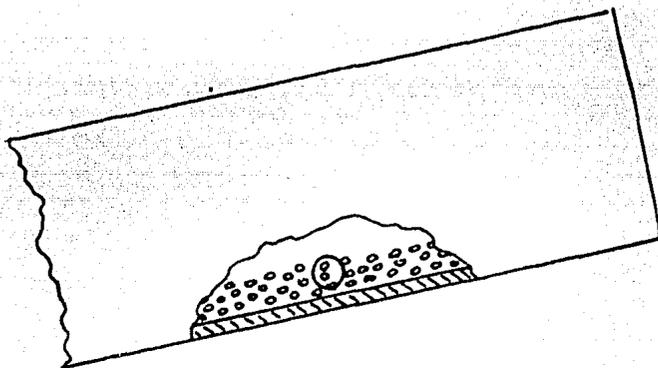
El equipo más utilizado para dicho fin es el horno rotatorio. - Donde, por ejemplo como se muestra en la figura 4.8, existe contacto entre los sólidos en punto comunes, en los cuales se logra una transferencia de energía por conducción. Para que se efectúe la reacción, lo más usual, es que uno de los sólidos funda y de esta forma rodee al otro sólido, a fin de tener mayor área de contacto entre las dos fases, y el rendimiento de la reacción - aumente.

#### 4.3 MEZCLADO DE MATERIALES

Debido a las temperaturas a las que ocurren los procesos que se estudian en este trabajo, los sistemas de mezclado comunes (como agitadores mecánicos), son inapropiados, debido a que se presenta una elevación de costos de operación y mantenimiento en general. Por lo anterior, se utilizan otros sistemas de mezclado más adecuados para las condiciones que - prevalecen en un proceso dado.

Para tal efecto, en este trabajo se divide el mezclado en tres formas, de pendiendo del tipo de material utilizado, y que son:

FIGURA 4.8  
FLUJO DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA ENTRE FASES  
SOLIDAS POR EL MECANISMO DE CONDUCCION,  
EN UN HORNO ROTATORIO



 SOLIDO A

 SOLIDO B



- Mezclado gas-gas
- Mezclado sólido-sólido
- Mezclado gas-sólido

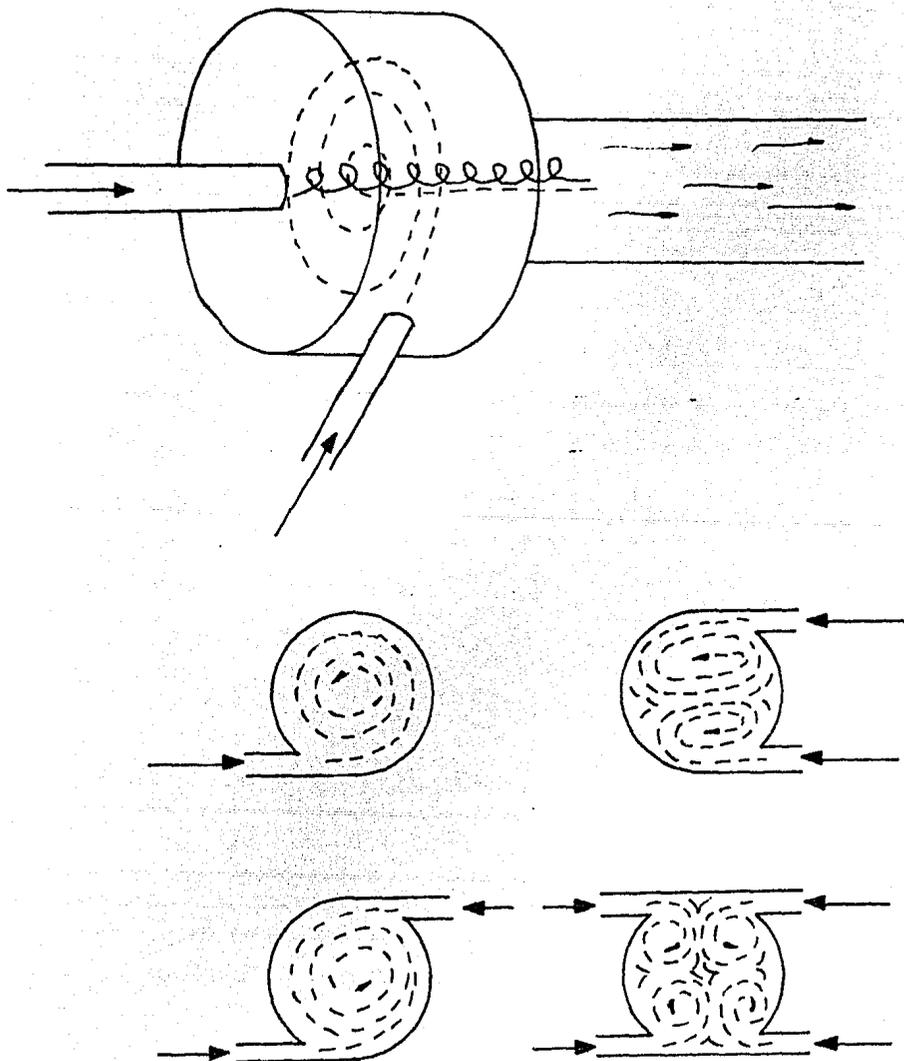
#### 4.3.1 MEZCLADO GAS-GAS

El mezclado de corrientes gaseosas se lleva a cabo aprovechando básicamente la turbulencia desarrollada en flujos a alta velocidad y con base en la distribución de las corrientes gaseosas a través del equipo, que induzcan patrones de mezclado eficientes. Dentro de los sistemas de mezclado de corrientes gaseosas más comunes se encuentran los ductos de alimentación de tubos concéntricos con terminaciones en boquillas de área reducida, con lo cual se obtienen altas velocidades a la salida de los ductos, desarrollándose una turbulencia tal que se logra un mezclado instantáneo y casi perfecto.

Otro sistema de alimentación de corrientes gaseosas, introducido en el diseño de hornos, con fines de obtener altas eficiencias de mezclado, lo constituye la alimentación tangencial de corrientes gaseosas, lo cual da lugar al desarrollo de patrones de mezclado de tipo espiral como los que se muestran en la figura 4.9.

Otra forma de mezclado utilizada en los procesos a altas temperaturas, es el flujo cruzado, en donde uno de los gases entra en forma cruzada al flujo axial del otro gas, produciéndose un

FIGURA 4.9  
PATRONES DE FLUJO EN LOS PUNTOS  
DE ALIMENTACION TANGENCIAL



patrón de mezclado que depende de las velocidades de flujo de ambas corrientes gaseosas. Este tipo de sistemas se presenta en la figura 4.10.

#### 4.3.2 MEZCLADO SOLIDO-SOLIDO

El mezclado de sólidos en procesos a alta temperatura, se lleva a cabo por dos métodos básicamente: uno consiste en el premezclado o mezclado de materiales previo al tratamiento de temperatura elevada, por los métodos convencionales o de acuerdo a las características del proceso; por ejemplo, en el caso de la calcinación del carbonato de bario (56), como un paso previo, se mezcla la materia prima (carbonato de bario y carbón), con un aglutinante que se elimine al incrementarse la temperatura (como puede ser harían de maíz, de trigo, etcetera, o bien una solución azucarada), desecando dicha mezcla, a temperatura de 100-110°C para obtener nuevamente los sólidos en forma conglomerada.

El segundo método consiste en la inducción de un movimiento rotacional (horno rotatorio), en donde a una cierta velocidad de rotación, los sólidos se van mezclando. En este caso, se evita trabajar a bajas velocidades a las que se favorece la formación de capas de tamaños de partícula pequeños, como se observa en la figura 4.11a, así como a una velocidad de rotación elevada que puedan aumentar los costos de operación.

FIGURA 4.10  
MEZCLADO DE DOS GASES POR ALIMENTACION DE UNO  
DE LOS GASES EN FLUJO CRUZADO

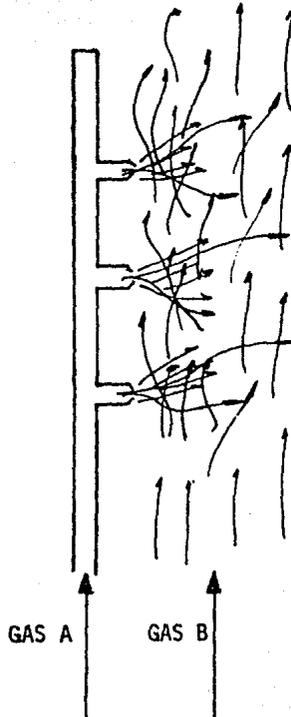
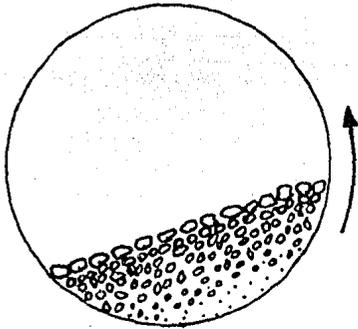
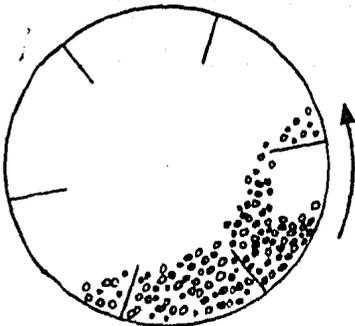
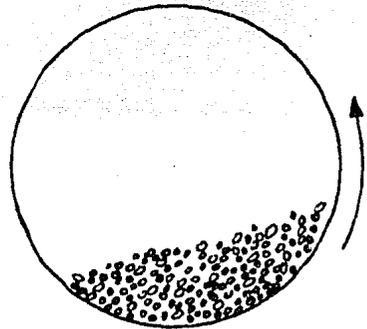


FIGURA 4.11  
MEZCLADO DE SOLIDOS EN PROCESOS A ALTAS TEMPERATURAS



a. SEPARACION DE CAPAS POR BAJA VELOCIDAD Y UNA VARIADA DISTRIBUCION DE DIAMETRO DE PARTICULA

b. MEZCLADO BUENO POR ALTA VELOCIDAD Y POCA DIFERENCIA EN TAMAÑO PARTICULA



c. MEZCLADO BUENO POR MAMPARAS EN EL EQUIPO CON VELOCIDAD MODERADA

Existen formas que evitan la formación de capas de partículas, - en hornos rotatorios, tales como: alimentar sólidos con un diámetro lo más uniforme posible como se observa en la figura 4.11b; ó bien colocar mamparas en el horno, como se observa en la figura 4.11c.

#### 4.3.3 MEZCLADO SOLIDO-GAS

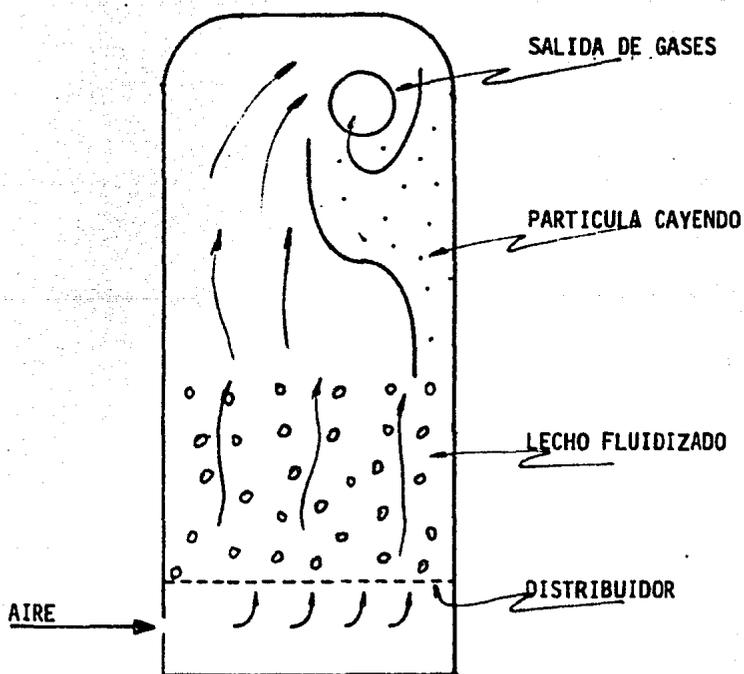
Si uno de los fines es el lograr un mezclado que se acerque a la idealidad entre el material sólido y gaseoso, debido a los requerimientos del proceso a alta temperatura, lo más recomendable es el lecho fluidizado, ya que provee el mejor mezclado entre sólidos y gases, debido a que asegura el contacto del fluido (gas), con todas las partes de la partícula sólida, y mantiene una uniformidad completa de los sólidos debido a la total agitación (30).

Se han propuesto algunos sistemas (17), para mejorar la eficiencia de reacción en sistemas fluidizados, mediante la mejora de las formas de mezclado, tal como se muestra en la figura 4.12, - en donde se utilizan implementos que forman corrientes de vórtice para que regrese el sólido y no sea elutriado y obtener una mejor eficiencia del proceso.

#### 4.4 SEPARACION DE MATERIALES

En los procesos a altas temperaturas, que se consideran en este trabajo,

FIGURA 4.12  
SISTEMA QUE LOGRA QUE LOS GASES DESPUES DE  
UN LECHO FLUIDIZADO, FORMEN VORTICE  
CON LO QUE LOS SOLIDOS QUE PUEDAN SER  
ELUTRIADOS, CAIGAN DE NUEVO AL LECHO



La separación de materiales se efectúa principalmente de dos maneras:

- Por diferencia de densidades (separaciones tipo gas-sólido).  
En dos tipos: para mezclas gas-sólido de tamaño de partícula grande por fuerza de gravedad, y por fuerza centrífuga, para partículas de tamaño pequeño.
- Por diferencia de tamaño de partícula (separación tipo sólido-sólido).

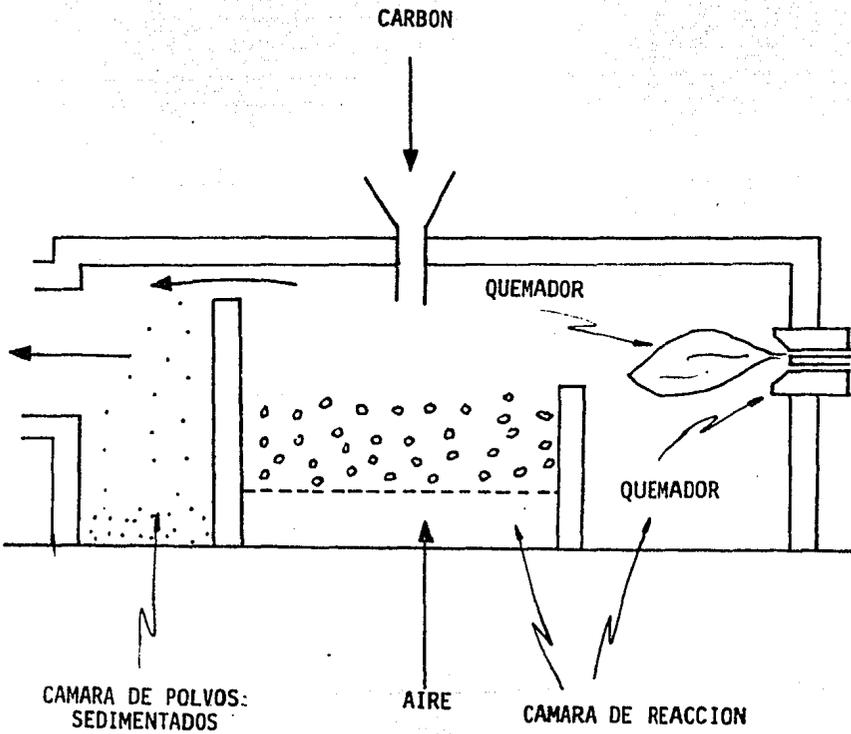
#### 4.4.1 SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE DENSIDADES

Este método, es el más utilizado en la separación gas-sólido y se basa en la diferencia existente entre la densidad de un fluido (regularmente gaseoso), y un sólido. Un ejemplo lo presenta Highley (17), donde en un proceso de combustión de carbón, se coloca una cámara de sedimentación de polvos de tipo convencional, como se muestra en la figura 4.13, para eliminar carbón de los gases de combustión, provenientes de la cámara de reacción.

En general en toda corriente efluente de un proceso, con sólidos y gases, éstos son separados por la diferencia existente entre ambas fases, ya sea por medio de un proceso a flujo paralelo (17, 56,60), ó a contracorriente (45,46).

Cuando el tamaño de partícula es pequeño, que no puede ser separado por efecto de la gravedad, se procede a utilizar la fuerza

FIGURA 4.13  
SISTEMA DE SEPARACION DE SOLIDOS  
CONTENIDOS EN GASES



centrífuga, que puede aumentar hasta en cinco veces la fuerza de gravedad, mediante el uso de ciclones convencionales, en el proceso (45,46,56).

#### 4.4.2 SEPARACION DE MATERIALES POR DIFERENCIA DE TAMAÑO DE PARTICULA

Esta forma de separación de sólidos se utiliza con frecuencia para tener uniformidad en el tamaño de partícula del material obtenido, y por lo general se efectúa en un medio fluido (46,49). - Por ejemplo, en la calcinación de boratos (46), donde al calcinar el material, se reduce el tamaño de partícula, en un medio fluidizado, se logra fluidizar cierto tamaño de partícula, separándolo de la del resto de la mezcla hasta una altura tal que pueda el producto obtenido desalojar el lecho por un conducto adyacente, como se muestra en la figura 4.14.

Otra forma propuesta para separar productos sólidos se observa en la calcinación de carbón (60), donde en un lecho fluidizado continuo, se hace pasar la mezcla de sólidos por cilindros cada vez mayores, como los ilustrados en la figura 4.15, donde debido al aumento del área transversal, (a) disminuyen la velocidad de fluidización y ciertos sólidos con un rango de tamaño de partícula determinado, no pueden fluidizar y caen para ser recolectados por ductos (b) dispuestos para tal propósito.

FIGURA 4.14  
SISTEMA DE SEPARACION DE SOLIDOS POR EFECTO DEL  
TAMAÑO DE PARTICULA EN LECHOS FLUIDIZADOS

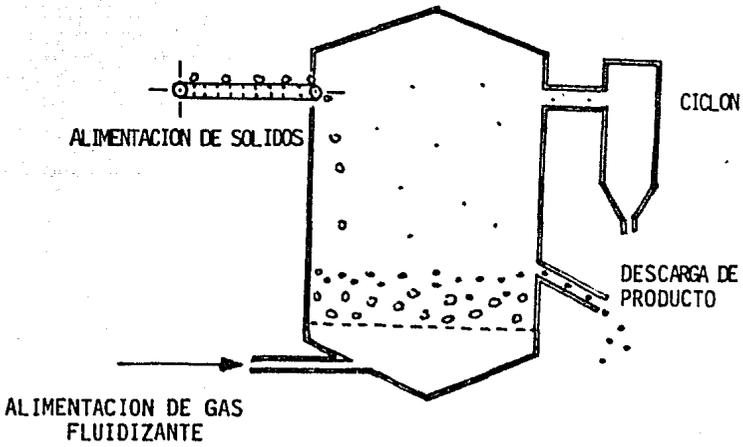
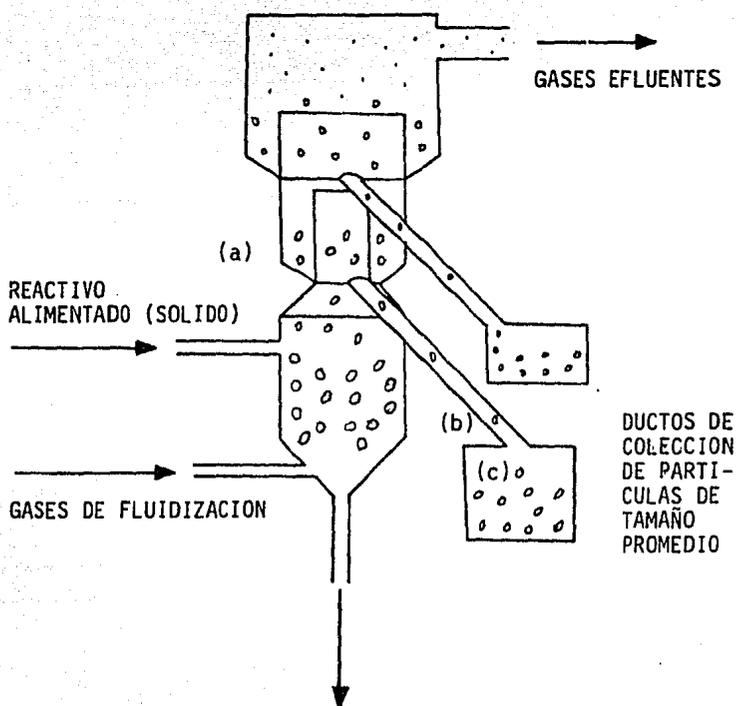


FIGURA 4.15  
SEPARACION DE SOLIDOS DE ACUERDO  
A SU TAMAÑO DE PARTICULA



#### 4.5 TRANSFERENCIA DE ENERGIA GLOBAL

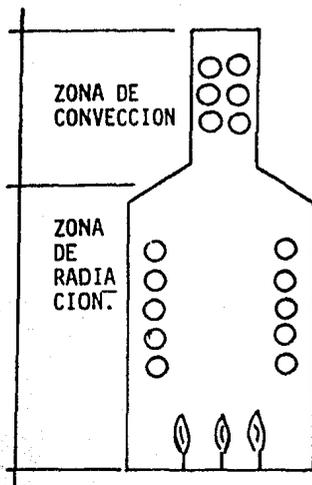
La transferencia de energía global en los procesos a alta temperatura se lleva a cabo simultáneamente por medio de los tres mecanismos conocidos: conducción, convección y radiación. Cada mecanismo se presenta en mayor o menor grado, dependiendo de la zona del equipo. Esto es, si se observa la figura 4.16, se nota que los hornos se pueden dividir en dos zonas principalmente, de acuerdo al mecanismo de transferencia de energía que se presente en mayor grado. El mecanismo de conducción, se presenta -- principalmente en el material de proceso sólido, así como en las partes que conforman el equipo (es decir, paredes, aislantes, etcetera).

A continuación, se describe por separado cada uno de los mecanismos de transferencia de calor.

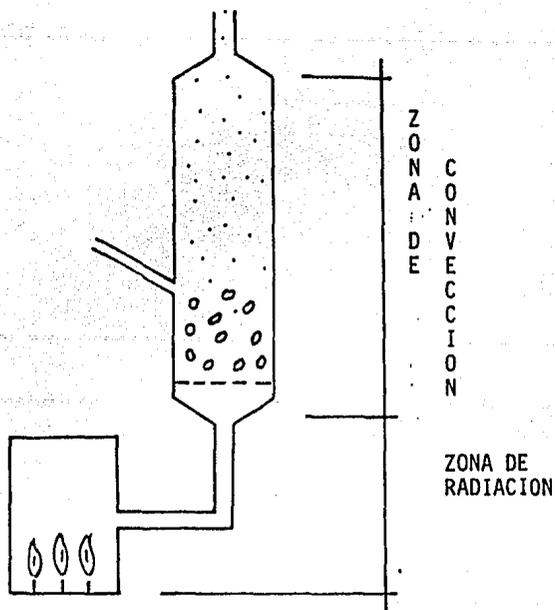
##### 4.5.1 MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

Este mecanismo se presenta en los sólidos de proceso para elevar su temperatura, así como en las paredes del equipo, donde puede transferir calor al material de proceso ó bien transferir calor a los alrededores, siendo esto último una pérdida de energía. - En la figura 4.17 se muestra la dirección de flujo de calor que se presenta en los hornos mediante el mecanismo de conducción, y que es en ángulo recto a la pared.

FIGURA 4.16  
 DIVISION DE HORNOS, DE ACUERDO  
 A LA TRANSFERENCIA DE ENERGIA PREDOMINANTE



a. HORNO TIPO CONVENCIONAL



b. HORNO TIPO LECHO FLUIDIZADO

FIGURA 4.16 (CONTINUACION).  
DIVISION DE HORNOS, DE ACUERDO A LA  
TRANSFERENCIA DE ENERGIA PREDOMINANTE

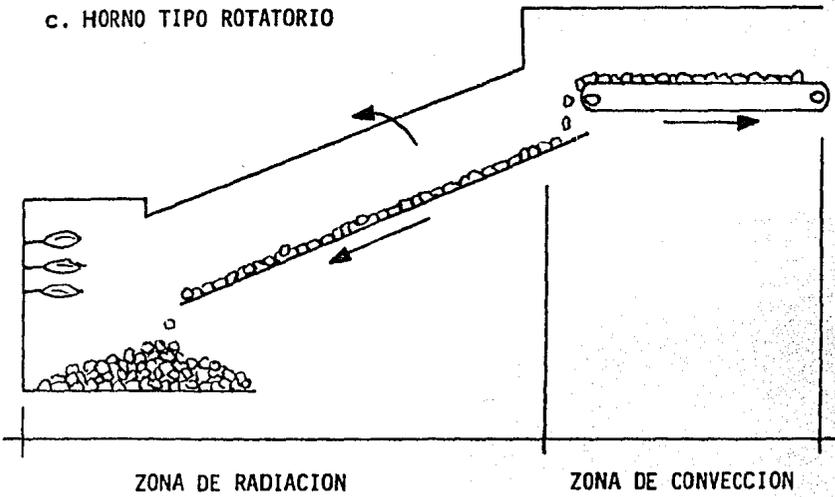
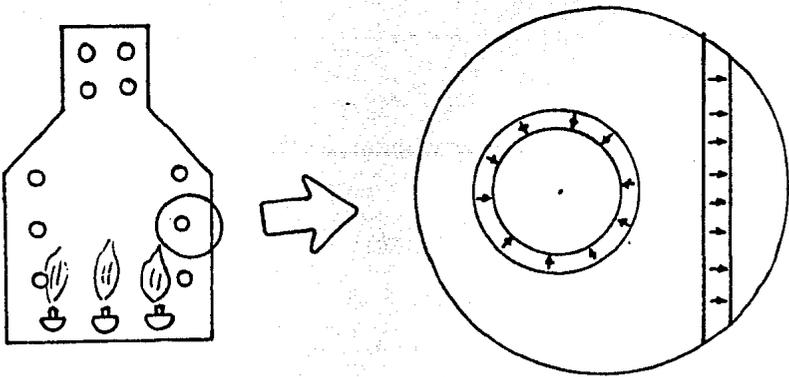


FIGURA 4.17  
PATRON DE FLUJO DE CALOR  
POR EL MECANISMO DE  
CONDUCCION EN UN  
HORNO TIPO  
CONVENCIONAL



#### 4.5.2 MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

En los equipos de altas temperaturas tratados en este trabajo, - la convección se presenta debido a las partes frías y calientes que existen relativamente en una fase fluida. Por ejemplo como se muestra en la figura 4.18 si la zona de generación se encuentra en una flama, los gases efluentes de dicha flama, están relativamente más calientes que los de los alrededores, los cuales a su vez están más calientes que los gases más distantes, y así sucesivamente. Estas diferencias consecutivas, hacen que el mecanismo de convección se active, mediante convección natural. Sin embargo, la mayoría de las veces debido a la velocidad con que salen los gases del quemador y la geometría del equipo, se llega a generar una turbulencia que mejora aún más el mecanismo de convección.

#### 4.5.3 MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

Este mecanismo se presenta en las zonas del equipo de mayor temperatura, es decir en la zona de combustión, no teniendo un patrón de flujo específico ya que como se muestra en la figura 4.19 la radiación fluye en todas direcciones debido a que no requiere de un medio para transferirse como los otros mecanismos. El mecanismo de radiación, ocasiona grandes pérdidas de energía, ya que esta energía pasa a través de las paredes del equipo, las calienta y difunde el calor remanente hacia los alrededores del equipo.

FIGURA 4.18  
 PATRON DE FLUJO DE CALOR DE ACUERDO AL  
 MECANISMO DE CONVECCION EN UN HORNO  
 TIPO LECHO FLUIDIZADO

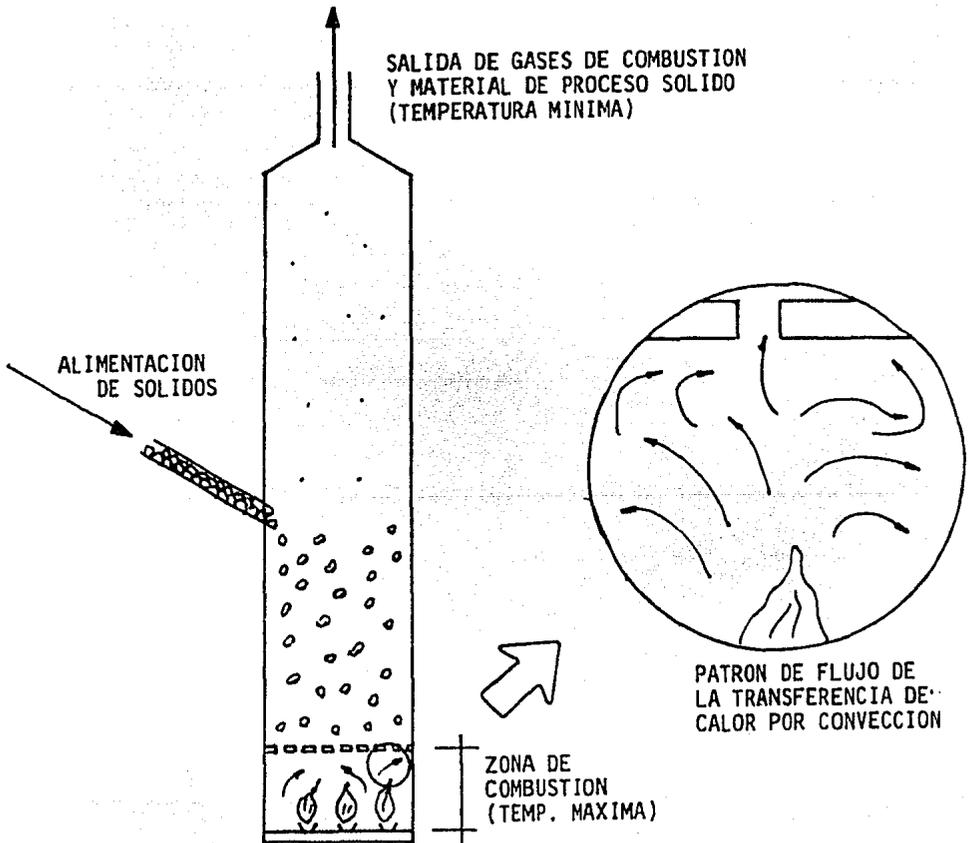
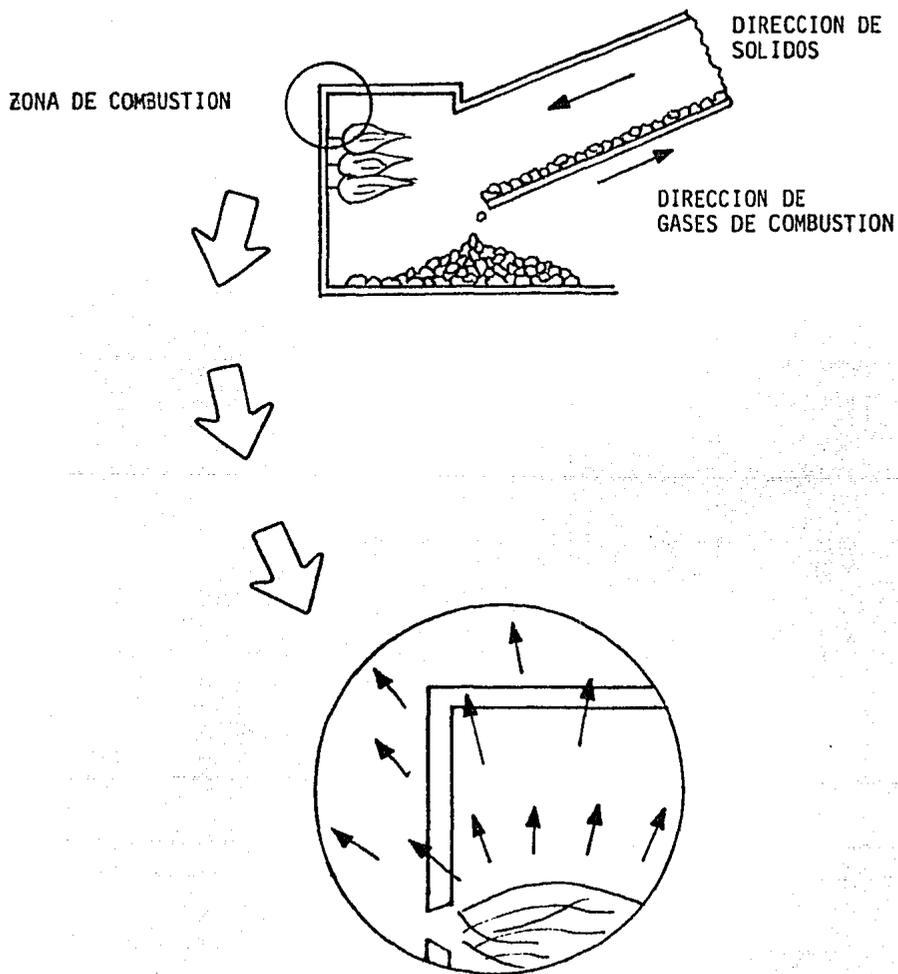


FIGURA 4.19  
PATRON DE FLUJO DE CALOR  
DE ACUERDO AL MECANISMO DE  
RADIACION EN LA ZONA DE COMBUSTION  
DE UN HORNO ROTATORIO



#### 4.6 GENERACION DE ENERGIA Y REACCION

En este apartado se presenta, cómo y dónde ocurre la generación de energía dentro de los equipos a altas temperaturas así como las reacciones que se llevan a cabo dentro de los equipos, y que modelos de reactores podrían representarlos.

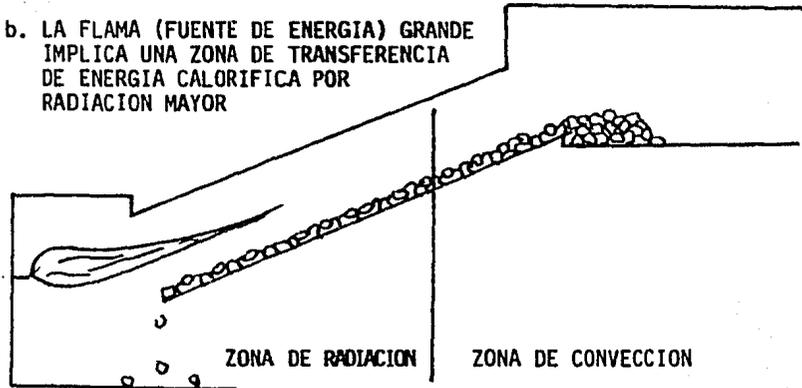
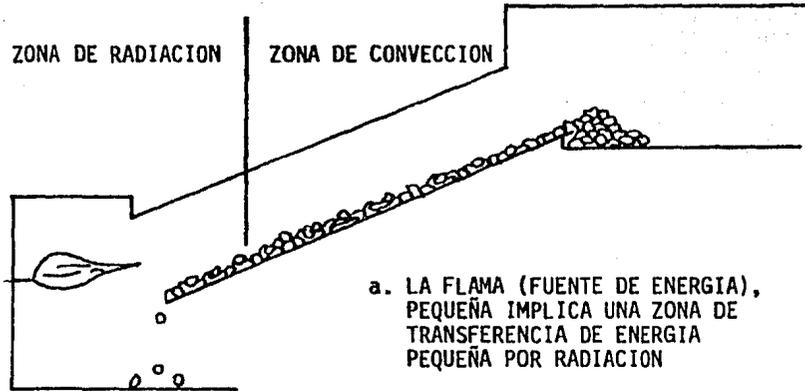
##### 4.6.1 GENERACION DE ENERGIA

En los procesos a altas temperaturas manejados en este trabajo, se requieren de grandes cantidades de calor para alcanzar las temperaturas a las cuales las reacciones del proceso toman lugar. Una de las formas más comunmente utilizadas en tales procesos para suministrar la energía calorífica necesaria, son las reacciones de combustión, en las cuales ocurre la generación de energía.

La generación de energía, ocurre dependiendo de las necesidades del proceso en: el horno, ya sea en contacto directo ó indirecto con el material de proceso, ó bien en una cámara aparte en los alrededores del horno.

Un ejemplo de generación de energía dentro de un horno, es el presentado en la figura 4.20 en un horno tipo rotatorio en donde la energía generada por la reacción de combustión en el horno, puede hacer que la flama se forme a lo largo de una distancia definida, a fin de que la zona de radiación en el equipo se amplíe,

FIGURA 4.20  
EFECTO DEL AUMENTO DE LA ZONA  
DE RADIACION POR AUMENTO  
EN EL TAMAÑO DE LA FLAMA



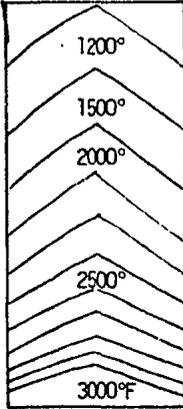
como se muestra en la figura 4.20b ó se reduzca (figura 4.20a), de acuerdo a las necesidades del proceso. En un horno donde la generación de energía se efectúa en una cámara fuera del horno - propiamente dicho, los gases de combustión con alto nivel energético, son los que dentro del horno transfieren el calor necesario para alcanzar las temperaturas requeridas por el proceso de interés.

En general, se considera que existen tres lugares en donde la generación de la energía se lleva a cabo en un horno, y de acuerdo a éstos, se obtiene un diferente perfil de temperaturas como consecuencia del flujo que presentan los gases de combustión en el equipo. Los tres lugares donde se lleva a cabo la generación de energía son: a) en cámaras de combustión fuera del horno y que -- presentan un flujo de gases del tipo flujo tapón; b) en la parte inferior del horno en equipos tipo vertical, y en equipos horizontales, en especial en el tipo rotatorio, en el extremo cerca de la salida del material sólido, y que presentan un flujo de gases conocido como el de reactor bien agitado; y c) dentro del horno pero mediante flamas largas y tipo laminar que presenta un flujo llamado laminar sin difusión.

En la figura 4.21, se observan los tres perfiles de temperatura que se producen de acuerdo a la forma y lugar de generación de energía a lo largo del horno, y en la figura 4.22, aparece la variación del flujo de calor que se produce a lo largo del horno,-

FIGURA 4.21  
PERFILES DE TEMPERATURA  
EN HORNOS CILINDRICOS

SALIDA DEL HORNO



a. FLUJO TAPON

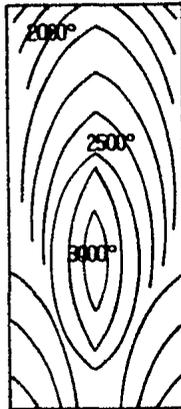
SALIDA DEL HORNO



b. REACTOR BIEN AGITADO

EXTREMO DEL QUEMADOR

SALIDA DEL HORNO



c. LAMINAR SIN DIFUSION

EXTREMO DEL QUEMADOR

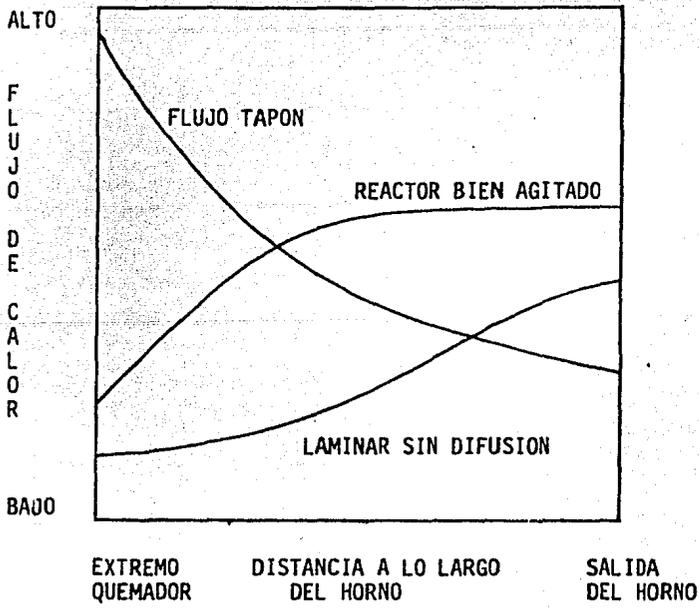
y en la figura 4.22, aparece la variación del flujo de calor que se produce a lo largo del horno mediante los tres tipos de generación de energía mencionados anteriormente, en donde se observa que para que el flujo térmico sea uniforme dentro del horno, el tipo reactor bien agitado produce los mejores resultados. Mientras que si lo que se requiere es de un calentamiento elevado en la parte inferior del horno, y un descenso del flujo de calor a lo largo del equipo, el que da mejores resultados es el del tipo flujo tapón.

Se observa en general en la figura 4.22 que tanto el flujo tapón como el reactor bien agitado, dan una transferencia de calor máxima total, similar. De acuerdo a esta figura, se observa que la flama larga no da muy buenos resultados comparado con los otros dos tipos presentados.

#### 4.6.2 REACCION

Las reacciones de proceso, como son calcinación, óxido-reducción, etc., que se llevan a cabo en los equipos a altas temperaturas, se efectúan en el banco de tubos, en la longitud del horno, ó en el lecho fluidizado, dependiendo del tipo de horno utilizado. Estas zonas, a su vez pueden dividirse en subzonas más pequeñas, las cuales pueden ser representadas por los modelos de los reactores de acuerdo a sus características. Por ejemplo, cuando se maneja una zona en donde existe una alta turbulencia, inducida -

FIGURA 4.22  
TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNO DE ACUERDO  
A LA FORMA DE GENERACION DE ENERGIA



por un patrón de flujo como puede ser helicoidal, flujo cruzado, etc., donde se pueden obtener condiciones que se asemejen a un mezclado perfecto, entonces puede considerarse un modelo del tipo **reactor de tanque agitado continuo (RTAC)**; por otro lado cuando la reacción va ocurriendo a lo largo de un tubo donde no existe un mezclado perfecto en todo el largo del equipo, y que la dirección del flujo de reactivos es solo en la dirección radial, y no en la axial, así como que exista una velocidad uniforme a lo largo del radio del tubo, puede entonces proponerse un modelo de reactor del tipo **reactor tubular de flujo continuo (RTFC)**; de igual forma se pueden considerar modelos con dispersión axial, etc. de acuerdo a las características del proceso y del equipo empleado.

Con el análisis de todas estas subzonas, es con lo que se puede conformar un modelo final de un equipo a alta temperatura.

Ejemplos de aproximación a los equipos utilizados en este trabajo son: Horno tipo lecho fluidizado sin transporte, se puede considerar un reactor bien mezclado, debido a que el material suspendido en el inicio del lecho se considera que tiene las mismas condiciones que el material suspendido al final del lecho, por lo que puede aproximarse a un RTAC mientras que un lecho fluidizado con transporte, por sus características se puede aproximar a un RTFC.

Un horno convencional se puede aproximar a un RTFC tanto en los tubos como en la cámara de combustión ya que las condiciones de temperatura y composición varían con la longitud de la trayectoria.

#### 4.7 FENOMENOLOGIA DE QUEMADORES

Los quemadores son de importancia por el hecho de que en ellos se realizan las operaciones de mezclado y reacción de los reactivos involucrados en la reacción de combustión, la cual provee energía o productos de reacción al proceso.

A continuación se presentan los aspectos fenomenológicos a nivel equipo, de quemadores, en forma similar al tratado en hornos.

##### 4.7.1 MANEJO DE MATERIALES

Se han desarrollado diferentes tipos de quemadores con el fin de manejar de la mejor forma posible los combustibles, dependiendo de la fase en que se encuentren éstos.

El manejo de los materiales, se realiza en forma similar al que se efectúa en el equipo principal, por lo cual no se abundará al respecto.

#### 4.7.2 CONTACTO ENTRE FASES EN QUEMADORES

De acuerdo a lo que se ha expuesto en fenomenología la función principal de los quemadores es la de proporcionar el combustible dentro del equipo tal que éste pueda pasar a fase gaseosa lo más rápido y eficientemente posible. De ahí que los parámetros que determinan este fenómeno son los que van a incidir en la eficiencia del quemador.

Cuando se maneja un combustible sólido es recomendable que el tamaño de partícula sea pequeño, ya que se aumenta el área de contacto de la fase sólida, con lo que se mejora la transferencia de masa y energía en el sistema.

Este aprovechamiento se refleja, en una mayor velocidad de vaporización ó sublimación del combustible sólido.

En el caso de combustible en fase líquida, es común atomizar ésta para obtener una mayor área de contacto entre las fases presentes, y de igual forma mejorar las transferencias de energía y masa, esto es, mediante el aumento de la temperatura del líquido en forma de gotas, lograr la vaporización del líquido en forma de gotas, lograr la vaporización del líquido y obtener el combustible en forma gaseosa, donde la reacción toma lugar.

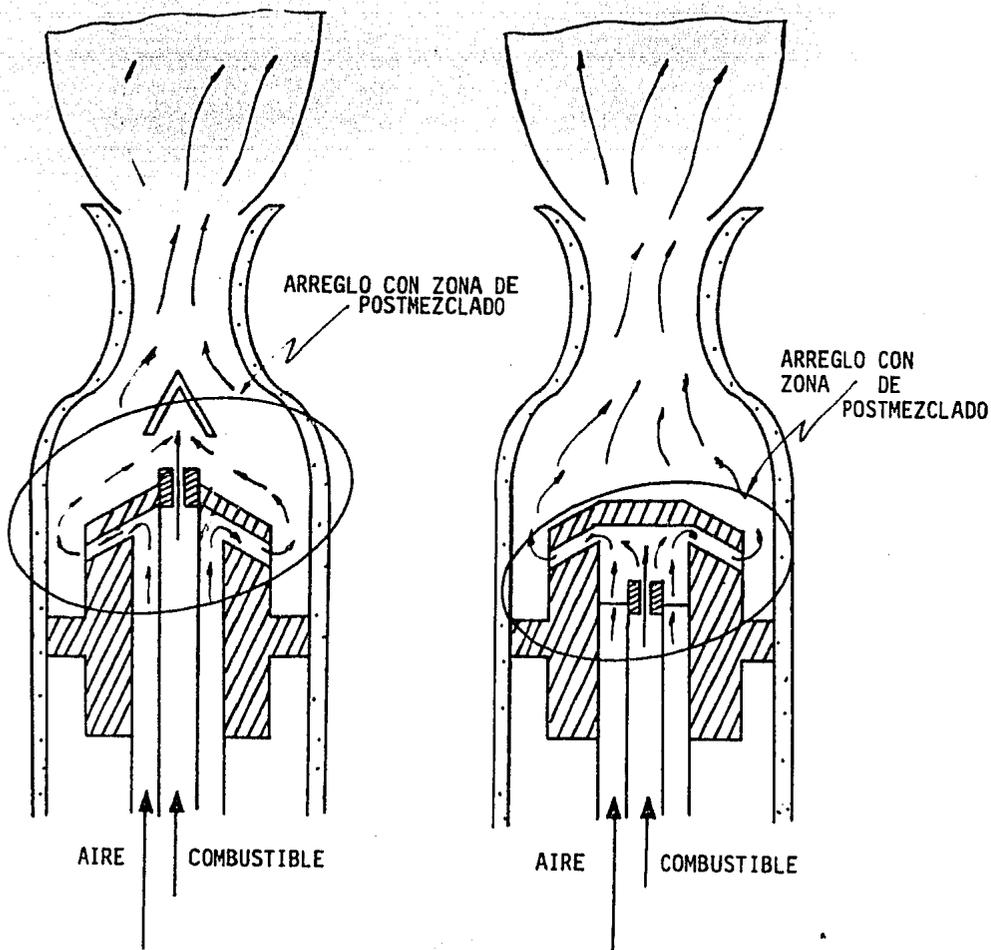
### 4.7.3 MEZCLADO

El mezclado adecuado de los reactivos en un quemador es muy importante para el adecuado funcionamiento de éste, ya que un mezclado ineficiente en las corrientes de combustible y agente oxidante ocasiona que estos materiales queden diseminados separadamente en diversas partes del equipo, razón por la cual se localizan grandes cantidades de oxígeno en algunos sitios del quemador, que reaccionan con solo parte del combustible en forma efectiva, liberando gran cantidad de energía en esa parte específica del equipo, pudiendo afectar las propiedades mecánicas del quemador.

#### A. MEZCLADO EN QUEMADORES QUE UTILIZAN COMBUSTIBLE LIQUIDO O GASEOSO

En base al mezclado que se tenga para reactivos líquidos ó gaseosos y el agente oxidante, en un quemador, se pueden clasificar éstos, en quemadores de pre y post mezclado. Los térmicos de pre y post mezclado están referidos al momento en el que se mezclan las corrientes de reactivos dentro del quemador. Si las corrientes se mezclan en alguna sección del quemador previa a la boquilla de salida de éste, como se muestra en la figura 4.23b, se dice que es un quemador de premezclado, si por el contrario las corrientes de reactivos se unen después de la boquilla, como se muestra en la figura 4.23a, en el momento mismo de la reacción se dice que el quemador es de postmezclado.

FIGURA 4.23  
DIFERENTES TIPOS DE MEZCLADO EN QUEMADORES



a. QUEMADOR DE POSTMEZCLADO

b. QUEMADOR DE PREMEZCLADO

El primer tipo de quemadores que se desarrolló fué el de postmezclado, pero la evolución de los equipos en la búsqueda de un mejor resultado en la combustión ha traído como consecuencia el desarrollo de quemadores de premezclado.

La razón por la cual la combustión es más satisfactoria en los quemadores de premezclado que en los de postmezclado, estriba precisamente en el mezclado obtenido, al ser éste en una cámara anterior a la boquilla, casi asegura que la corriente resultante vaya homogénea en su composición, con lo que el combustible va a tener suficiente agente oxidante a su alrededor para reaccionar, mientras que si no es así, el combustible no va a tener el oxígeno necesario para reaccionar completamente con lo que se obtienen áreas de diferente temperatura y un aprovechamiento parcial del combustible.

En algunas ocasiones se prefiere el uso de quemadores de postmezclado dependiendo de las características del proceso, como por ejemplo, en el caso de grandes quemadores, en los cuales, para evitar una reacción en la cámara de mezclado (en el caso de tratar quemadores de premezclado), se mezclan las corrientes fuera de la boquilla del equipo, o por costos de operación, ya que si el combustible es barato y no se requiere de mucha eficiencia se utiliza un quemador de postmezclado.

En la figura 4.24 se muestra la zona de mezclado en un quemador de tipo postmezclado (59), en el cual el combustible líquido ó gaseoso sale del quemador por un ducto central, y el agente oxidante incide ó penetra en forma angular al combustible en la zona de mezclado (I), si el combustible es gaseoso se presenta un patrón de mezclado de los reactivos antes de la combustión como el mostrado en la figura 4.24 en el caso de ser combustible líquido, ocurre una atomización por efecto de la corriente anular con lo que se logra una mayor área de contacto entre el combustible líquido y el gas oxidante al reducir las corrientes líquidas en pequeñas gotas.

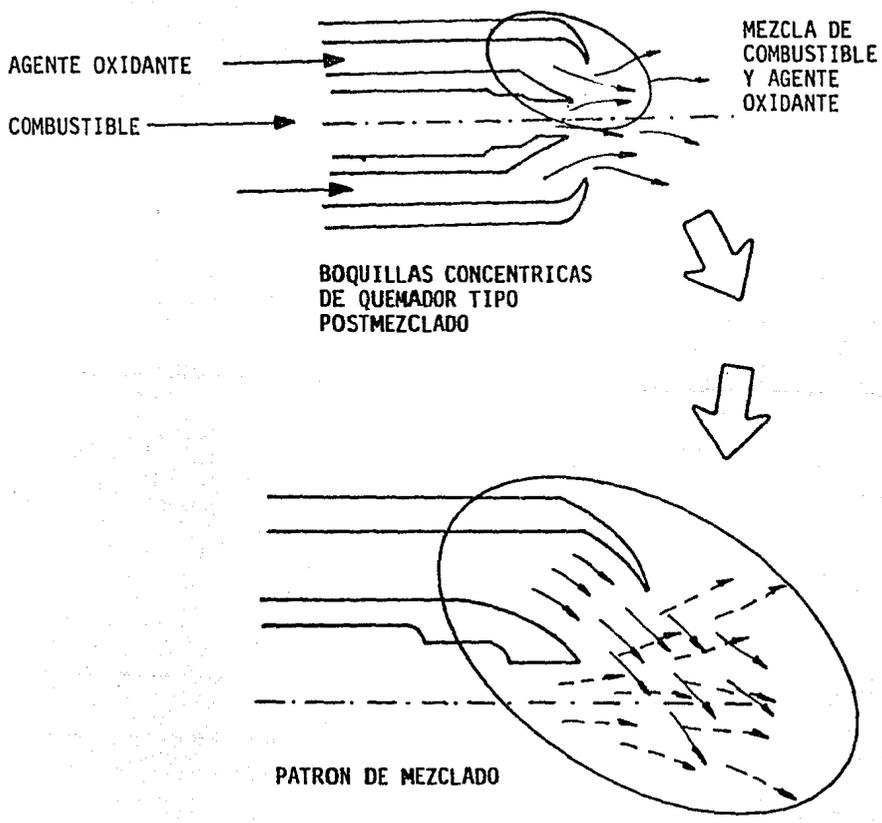
#### B. MEZCLADO EN QUEMADORES QUE UTILIZAN COMBUSTIBLE SOLIDO

En el caso de un reactivo sólido, se transporta el combustible - en suspensión en un gas, (llamado aire primario), hasta llegar - al quemador en si, donde se mezcla con la corriente de aire secundario, de la cual se requiere para llevar a cabo la combustión completa.

El mezclado de la corriente gaseosa (aire secundario), y de la - corriente de la suspensión se lleva a cabo principalmente de -- tres formas distintas:

La primera de ellas consiste en alimentar el aire secundario a - una cámara que rodea al tubo del quemador, este gas sale al horno

FIGURA 4.24  
ZONA DE MEZCLADO DE UN  
QUEMADOR DE POSTMEZCLADO



por un orificio anular a la boquilla de descarga del quemador en forma similar a la ilustrada en la figura 4.25a. La segunda forma de mezclado es cuando sale la corriente de la suspensión del quemador y la corriente de aire incide a alta velocidad sobre ella como se ilustra en la figura 4.25b. La tercera forma es la ilustrada en la figura 4.25c, en donde la suspensión es alimentada en forma anular en una cámara, con lo que se le proporciona movimiento turbulento, y posteriormente se inyecta el aire a través de otro ducto anular en una segunda cámara, con lo que se asegura un buen mezclado de las corrientes para su posterior ignición.

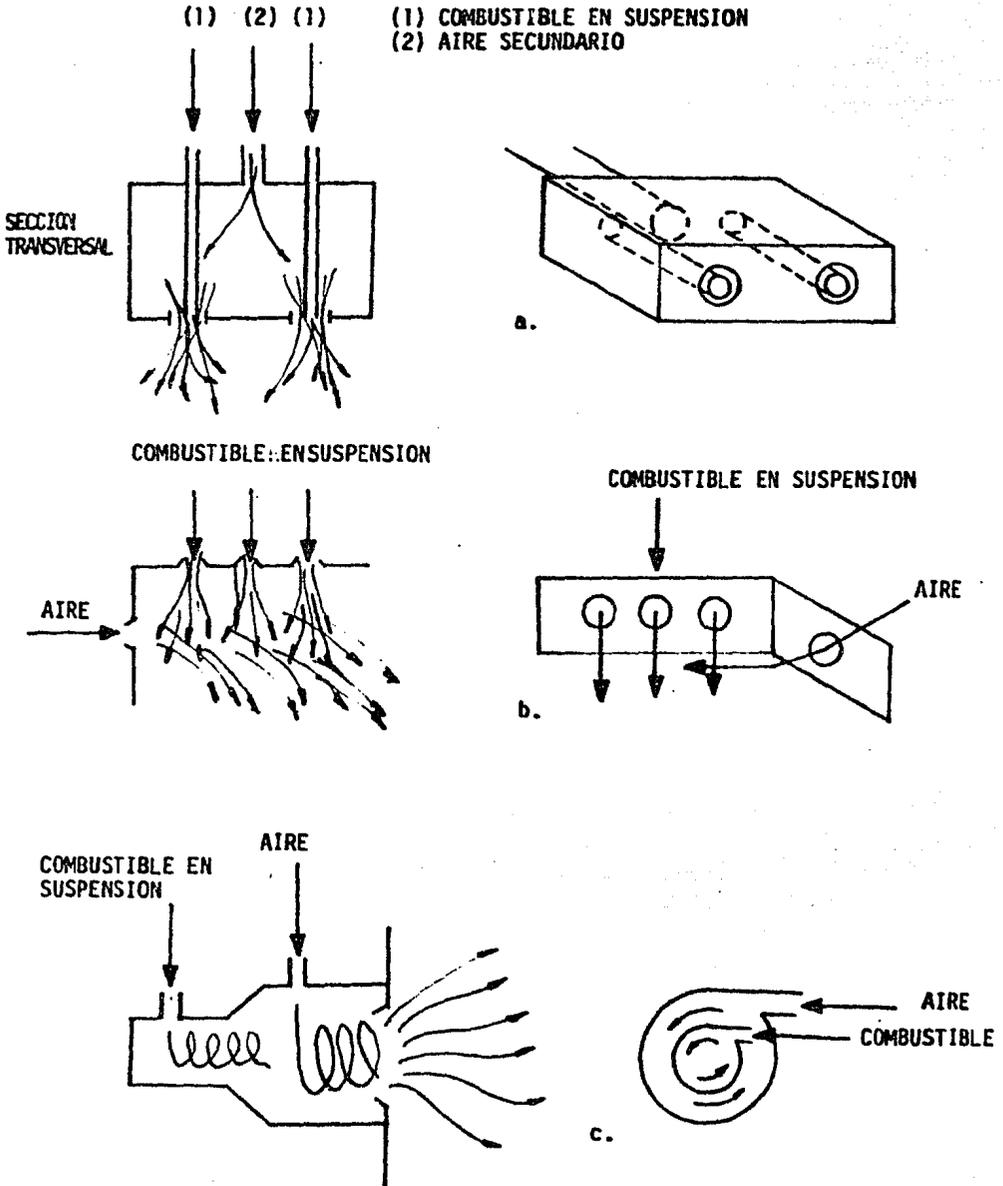
Recientemente Higley (17), propone como quemador de sólidos al lecho fluidizado, debido a que existe un mejor mezclado entre el combustible y el aire de combustión.

#### 4.7.4 TRANSFERENCIA DE ENERGIA

La transferencia de energía en quemadores, es tratada aquí diferenciando lo que sucede antes (primera zona) y después (segunda zona), de la boquilla de descarga del quemador.

Antes de la boquilla de descarga del quemador la transferencia de energía comienza con el transporte de materiales hacia el quemador; estos materiales reciben calor dependiendo del sistema de recuperación de energía que formen, esto es:

FIGURA 4.25  
MEZCLADO EN QUEMADORES QUE  
UTILIZAN COMBUSTIBLE  
SOLIDO



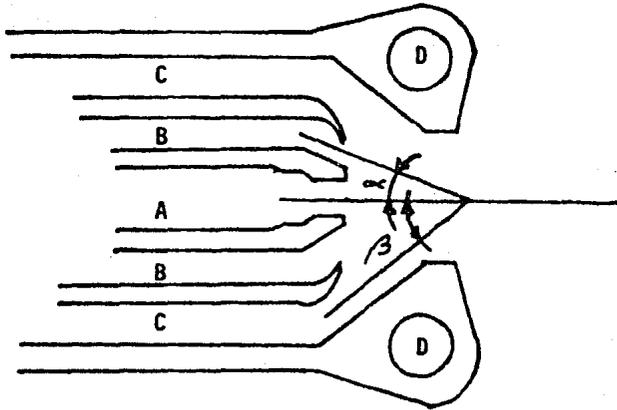
- Los materiales de alimentación al quemador en combinación con los gases que salen del equipo a través de la chimenea conforman el sistema de recuperación de energía del proceso. En este caso la transferencia de energía se realiza por el mecanismo de conducción y convección de los gases efluentes con alto contenido de energía hacia el combustible u agente oxidante.
- Una segunda forma de transferir energía a los materiales de alimentación al quemador es utilizar directamente los productos de combustión, como en los quemadores recuperativos, en donde el mecanismo de transferencia es el de radiación.

Cabe mencionar que las partes del quemador expuestas a muy altas temperaturas, se deterioran muy rápidamente, por lo que se han propuesto mecanismos (51), para evitar estos daños, algunos de ellos son:

- Circulación de un gas moderador de temperatura que envuelve prácticamente a los productos de la combustión, tal como se muestra en la figura 4.26.
- Circulación de un fluido frío anular en la boquilla de descarga, como se ilustra en la figura 4.26.

Por otro lado, el manejo de presiones elevadas para manejar al combustible y agente oxidante hace que los tubos sean de un espesor considerable, por lo que la transferencia de calor por conducción se dificulta.

FIGURA 4.26  
POSICION RECOMENDABLE DE BOQUILLAS  
PARA EVITAR DAÑOS A LAS PARTES  
EXPUESTAS DEL QUEMADOR



- A. COMBUSTIBLE
- B. AGENTE OXIDANTE
- C. GAS MODERADOR
- D. FLUIDO REFRIGERANTE

Además, esta primera sección recibe grandes cantidades de energía, por el mecanismo de radiación, que proviene de los productos de la combustión generados en la segunda zona.

En la segunda zona (posterior a la boquilla de descarga), es donde se lleva a cabo la combustión, por lo que esta zona es un distribuidor de energía radiante que se dirige en todas direcciones; hacia el horno, hacia el exterior del horno (como pérdida de energía), e incluso hacia la primer zona.

En algunos lugares el mecanismo de transferencia de energía no es el de radiación, ya que intervienen otros factores que modifican el patrón de flujo de calor, por ejemplo, en algunas zonas del horno debido a la turbulencia local, el mecanismo de transferencia de energía por convección se hace apreciable.

Uno de los problemas comunes en la segunda zona es el de la recirculación de gases combustibles a las boquillas del quemador, que al reaccionar sobre éstas, provocan sobrecalentamiento y deposición de carbón en la superficie del quemador.

Para prevenir la recirculación los ángulos entre la boquilla del tubo de combustible, la boquilla del agente oxidante y la boquilla del gas moderador, deben ser tales que se prevenga la formación de corrientes en el sentido inverso al de los flujos originales, esto es, los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  en la figura 4.26 deben ser -

pequeños, con lo que las partículas tienden a disiparse y alejarse del quemador. Este efecto es muy rápido, casi instantáneo y ocurre a una distancia aparentemente muy cercana al quemador, aunque en realidad es a la apropiada para evitarle daños a éste.

En un quemador de tres tubos concéntricos, si la velocidad del gas moderador es muy alta, se provoca una gran turbulencia en los gases calientes dentro del quemador (1ª zona), que al pasar por la boquilla a la segunda zona ocasionan un deterioro de las partes expuestas al flujo de la mezcla; este problema puede solucionarse, variando el ángulo de la boquilla o acomodándolas en diferentes planos, en la tabla 4.1 se muestran los ángulos recomendados para la fabricación de las boquillas.

TABLA 4.1  
ANGULOS RECOMENDADOS Y TOLERADOS  
PARA LA FABRICACION DE BOQUILLAS  
PARA QUEMADORES DE DUCTOS CONCENTRICOS

	ANGULO PREFERIDO (°)	ANGULO TOLERABLE (°)
CORRIENTE DESCARGADA DEL TUBO ADYACENTE AL DEL COMBUSTIBLE	$\alpha$ 20 - 35	$\alpha$ 10 - 55
CORRIENTE DESCARGADA DEL TERCER TUBO CONCENTRICO	$\beta$ 25 - 45	$\beta$ 15 - 60

NOTA:  $\alpha$  y  $\beta$  REFERIDOS A LA FIGURA 4.26

## CAPITULO 5

### VARIABLES Y PARAMETROS CRITICOS DE OPERACION DE HORNOS

En este capítulo, se describen las principales variables y parámetros críticos que pueden afectar en un momento dado, el funcionamiento de los hornos, - objetos de este estudio, y como consecuencia, modificar substancialmente la - operación adecuada del proceso

Dichas variables y parámetros se presentan en la tabla 5.1, en la cual se mues tra la incidencia existente entre éstas, en los diferentes tipos de hornos - tratados en este trabajo.

TABLA 5.1  
PRINCIPALES VARIABLES Y PARAMETROS  
CRITICOS EN LAS OPERACIONES DE HORNOS

EQUIPO (HORNO)	CONVENCIONAL	ROTATORIO	LECHO FLUIDIZADO
<b>VARIABLES O PARAMETROS CRITICOS</b>			
1.- INCRUSTACION DE SOLIDOS EN PAREDES DEL EQUIPO	-	*	*
2.- PERDIDAS DE ENERGIA POR RADIACION	*	*	*
3.- TAPONAMIENTO DE CONDUCTOS	*	-	*
4.- EROSION POR CONVECCION DE FLUIDOS	*	-	*
5.- TEMPERATURA MAXIMA DE CALENTAMIENTO DE PARTES METALICAS	*	*	*
6.- TEMPERATURA MAXIMA DE LA CAMARA DE COMBUSTION	*	*	*
7.- MAXIMA CAIDA DE PRESION	*	-	*
8.- MAXIMA Y MINIMA VELOCIDAD DE FLUJO DE MASA	*	*	*
9.- TEMPERATURA DE PROCESO	*	*	*
10.- TAMAÑO DE PARTICULA	-	*	*
11.- DISTRIBUCION DE QUEMADORES	*	*	-

(\*) LOS CASOS EN CUESTION SE SEÑALAN CON UN ASTERISCO

A continuación se hace una breve discusión de los puntos indicados en la tabla 5.1.

### 5.1 INCRUSTACIONES DE SÓLIDOS EN PAREDES DEL EQUIPO

Este es un fenómeno que se presenta principalmente en los procesos en los cuales, la materia prima (al menos una de las especies), está en fase sólida, aunque puede presentarse el caso de fases fluidas con sólidos en suspensión.

Los equipos en donde se presenta el problema más comúnmente, son los hornos de tipo rotatorio y los hornos de tipo lecho fluidizado, ya que son los que regularmente manejan sólidos, la incrustación es provocada por la fundición del material (45,56), debido a una súbita reacción del material en las paredes del horno (ocasionado por la diferencia de temperaturas entre la pared y el sólido, haciendo que la pared actúe en ciertas ocasiones como catalizador) (5), por las altas temperaturas prevalcientes en los procesos estudiados en este trabajo.

Las incrustaciones de sólidos, se vuelven más críticas, cuando el calentamiento del horno es del tipo indirecto, debido a que la capa de sólidos que se incrustan, ofrece una resistencia más a la transferencia de energía calorífica (56).

Cuando la incrustación ocurre rápidamente, este efecto, puede reducir el área transversal del equipo, pudiendo en algunos casos provocar taponamiento de los conductos.

En la figura 5.1, se muestran esquemáticamente los efectos producidos -- por la incrustación de material sólido en las paredes de un horno de lecho fluidizado de calentamiento indirecto.

El grado de incrustación en un horno, depende del tipo de proceso, de -- las condiciones que prevalecen en el mismo, así como del equipo, por ejem plo: en el proceso de calcinación del carbonato de bario, anteriormente - se realizaba en hornos rotatorios donde existían incrustaciones del carbonato y óxido de bario; en procesos actuales de calcinación del carbonato de bario, ésta se realiza en hornos de lecho fluidizado, donde las in crustaciones se han reducido en forma significativa.

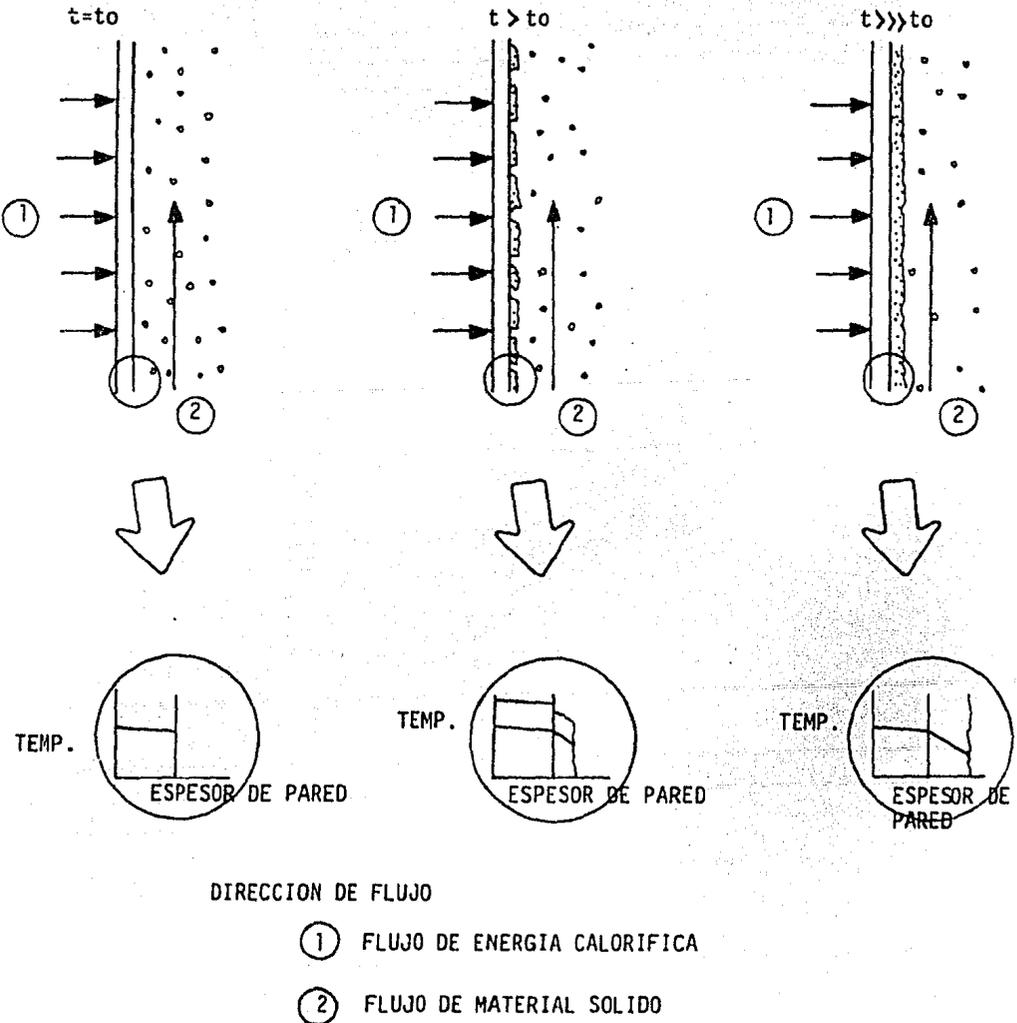
## 5.2 PERDIDAS DE ENERGIA POR RADIACION

Debido a las elevadas temperaturas a las que se llevan a cabo las operaciones estudiadas en este trabajo, el mecanismo de transferencia de calor por radiación, tiene gran importancia; la contribución de transferencia de calor por este mecanismo, llega a ser hasta de un ochenta por -- ciento (24), del calor total transferido en un proceso a alta temperatura.

Por tal motivo, las pérdidas de calor por radiación, son significativas en todos los equipos que operan a alta temperatura aunque existen pérdidas de calor por convección y conducción, éstas son relativamente pequeñas comparadas con las de radiación.

Las pérdidas de energía calorífica por radiación, aumentan a medida que

FIGURA 5.1  
CAMBIO EN EL PERFIL DE TEMPERATURA OCASIONADO  
POR EL INCRUSTAMIENTO EN UN HORNO A ALTA  
TEMPERATURA



se aumenta la temperatura del proceso, bajando el aprovechamiento del calor global generado, como se muestra cualitativamente en la figura 5.2.

Las pérdidas de calor pueden llegar, en un momento dado, a ser tales que en la zona dentro del equipo donde se efectúa la reacción principal del proceso, no se alcanza la temperatura requerida por el mismo, ésto lleva a incrementar la cantidad de combustible quemado por unidad de tiempo, - para alcanzar los niveles de temperatura necesarios en el proceso, lo - cual afecta los costos de producción, llegando en algunos casos, a hacer incosteable el proceso.

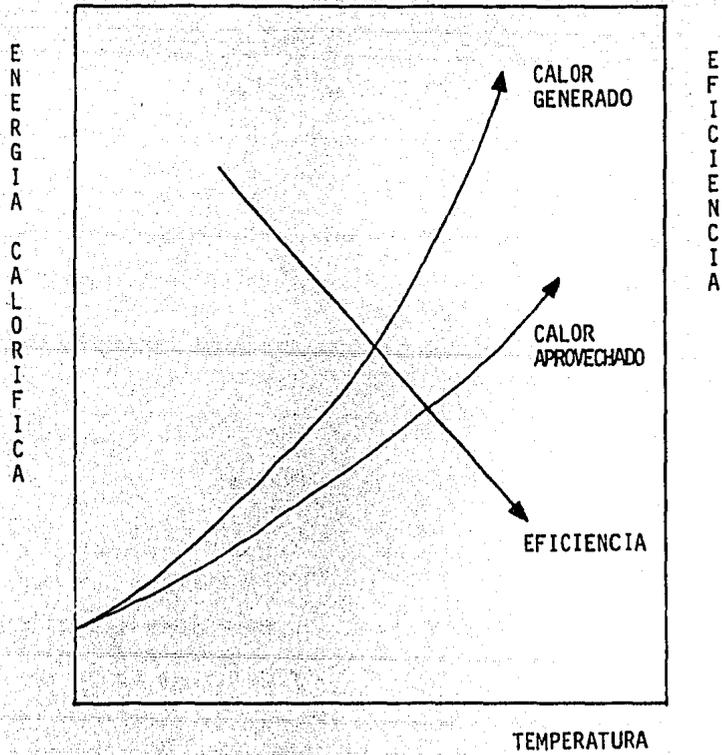
Las pérdidas de calor hacia los alrededores, pueden prevenirse, seleccionando materiales aislantes adecuados, ó buscando el mejor arreglo de los quemadores a fin de obtener un buen aprovechamiento del calor generado - dentro del equipo.

### 5.3 TAPONAMIENTO DE CONDUCTOS

El taponamiento de conductos, de los equipos de altas temperaturas, es - otro aspecto crítico que se debe tener en cuenta, puesto que puede afectar el funcionamiento del equipo y causar problemas, tanto mecánicos, como de bajo rendimiento en el proceso en general.

El taponamiento, se presenta principalmente en hornos del tipo convencional (con arreglos de tubos en serie y paralelo), y se debe a que los fluidos de proceso, contienen impurezas, que de alguna forma quedan

FIGURA 5.2  
REPRESENTACION CUALITATIVA DEL APROVECHAMIENTO DE  
ENERGIA CALORIFICA POR UN PROCESO, CONFORME  
AUMENTA LA TEMPERATURA



incrustadas en las paredes de los tubos, reduciendo con esto el área transversal del tubo, hasta llegar a obstruir finalmente la tubería.

Este fenómeno puede provocar una sobrepresión dentro de los tubos y llegar a ser que éstos sufran fracturas.

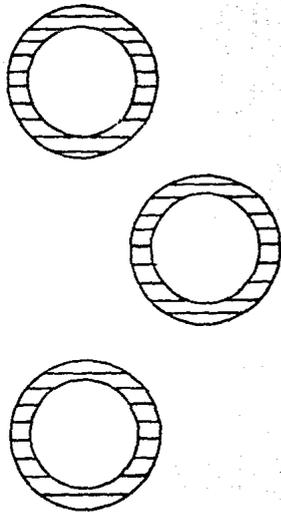
En otros equipos, tales como los lechos fluidizados, se presenta el taponamiento en los quemadores (59), principalmente, cuando éstos se encuentran en el piso del horno, lo cual se debe a que la fluidización es ineficiente, es decir, los sólidos fluidizados caen taponeando los ductos de los quemadores, con lo que el proceso de fluidización se ve reducido paulatinamente hasta llegar a ser nulo.

Al igual que en los ductos de los hornos convencionales, en los quemadores que manejan suspensiones con combustibles sólidos, se presentan incrustaciones en las boquillas de dichos quemadores que pueden llegar a obstruir la salida del combustible en suspensión.

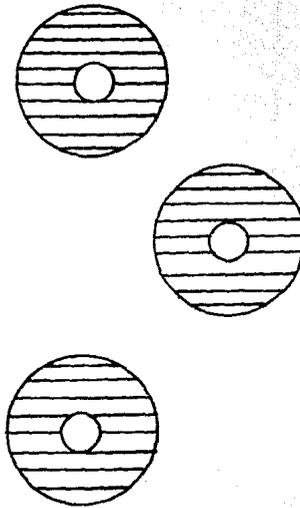
El taponamiento de ductos, que puede llegar incluso hasta detener por completo el proceso dentro del horno, se puede prevenir a través de un mantenimiento periódico de los ductos, y en el caso de los quemadores de lecho fluidizado, con el aumento de la velocidad a la que salen los gases de combustión del quemador.

En las figuras 5.3 y 5.4, se presenta gráficamente el taponamiento progresivo que puede ocurrir en ductos de equipos a alta temperatura.

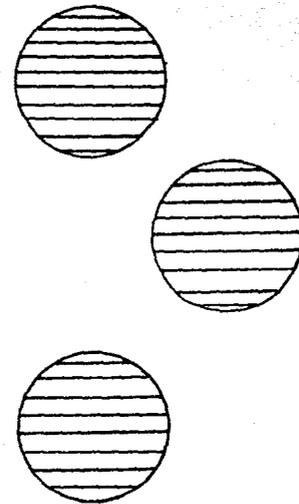
FIGURA 5.3  
TAPONAMIENTO PROGRESIVO DE DUCTOS POR INCRUSTACIONES  
DE IMPUREZAS CONTENIDAS EN LOS FLUIDOS DE PROCESO



$t = t_0$

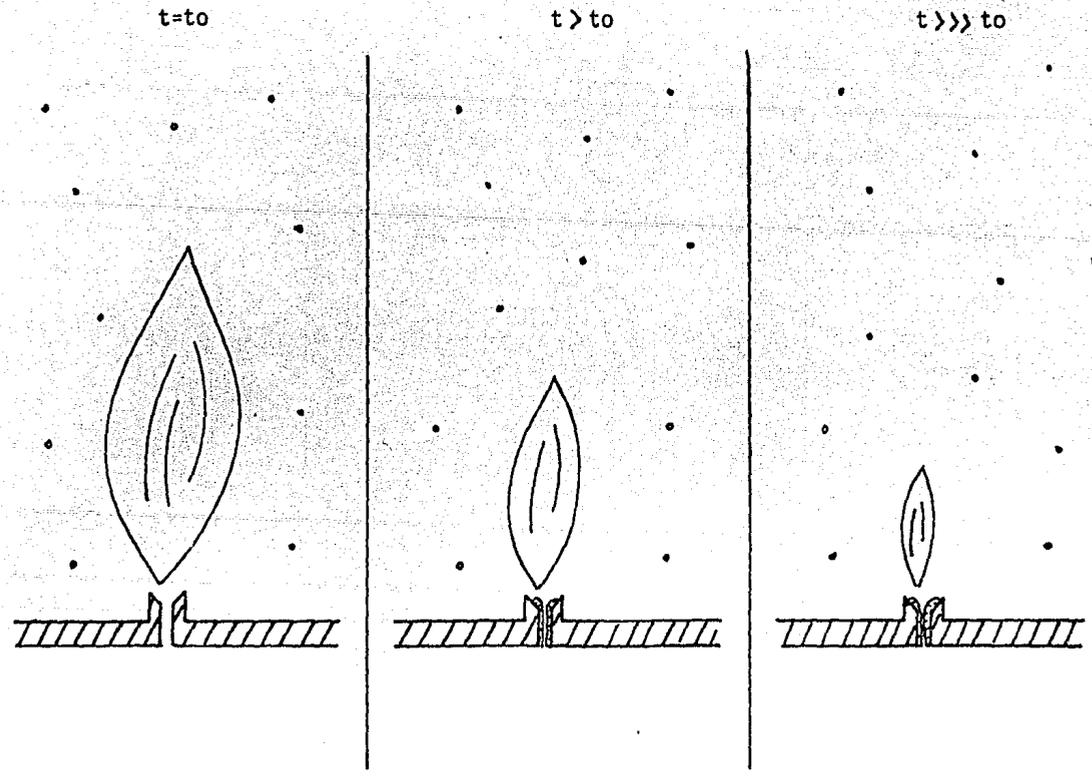


$t > t_0$



$t \gg t_0$

FIGURA 5.4  
TAPONAMIENTO DE DUCTOS DE QUEMADORES EN  
LECHO FLUIDIZADO INEFICIENTE



#### 5.4 EROSION POR CONVECCION DE FLUIDOS

La erosión de las partes que conforman el equipo, se debe principalmente, a las altas velocidades que en ocasiones se manejan en los procesos. Comúnmente este fenómeno se presenta en los hornos convencionales y de lecho fluidizado, por lo que es un parámetro crítico que se debe tener en cuenta en los diversos procesos que se llevan a cabo en este tipo de hornos.

Una de las partes del horno, donde se presenta más erosión, es en los quemadores, debido a que en ocasiones se requieren de velocidades de flujo elevadas (11), para lograr una mayor turbulencia y un buen nivel de mezclado, entre el combustible y el agente oxidante.

Igualmente puede haber erosión cuando, en el caso de un error de diseño, ó de una falla mecánica, las corrientes de gas a alta velocidad pueden dañar al equipo, por ejemplo, si se coloca la descarga de una boquilla cerca de la pared del horno, ó si algún quemador tiene rota la boquilla de descarga (16).

El principal problema causado por la erosión de los fluidos en las partes mecánicas del equipo, consiste en la reducción de la vida útil del equipo, así como en la elevación de los costos de mantenimiento del mismo. Cuando se realiza el diseño del equipo, es necesario considerar este aspecto y tomar algunas precauciones como pueden ser: no poner tubos (en el caso de hornos convencionales), a la salida de los haces de combustión

del quemador, elegir materiales de construcción resistentes, etcetera.

En las partes verticales del equipo se presenta erosión alrededor de partes que sobresalen de la superficie, como pueden ser los cordones de las soldaduras, por lo que se recomienda esmerilarlas (17).

Por otra parte, en procesos donde los reactivos ó productos de reacción, son sólidos, estos pueden experimentar el fenómeno de erosión a lo largo del equipo, debido al impacto del gas entrante a alta velocidad con las partículas sólidas provocando la fractura de éstas, lo que puede dar lugar al fenómeno de atrición, y un desalojo de los reactivos del horno bajando el rendimiento de la reacción. Lo anterior puede prevenirse mediante la reducción de la velocidad del fluido al entrar en contacto con el sólido de proceso.

#### 5.5 TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO DE PARTES METÁLICAS

En gran parte de los hornos, principalmente en los de calentamiento indirecto, se utilizan partes metálicas para separar los gases de combustión, de los materiales de proceso, debido a la alta conductividad de la energía calorífica que poseen los metales.

Sin embargo, el uso de los metales, se ve restringido hasta cierto punto, por la temperatura que prevalezca en el proceso; ya que dicha temperatura debe ser inferior a la temperatura de fusión del metal y además ---

inferior a una temperatura a la cual las propiedades mecánicas del metal, comienzan a menguar (72).

Por tal motivo, la temperatura máxima alcanzada dentro de un horno contribuyente a determinar el material de construcción del mismo, lo cual se refleja en los costos de adquisición del equipo, y en el tiempo de vida media del mismo. Aunque se pueden presentar situaciones como el de tener costos de adquisición de equipo elevados y una vida útil del equipo prolongada, ó viceversa.

#### 5.6 TEMPERATURA MAXIMA DE LA CAMARA DE COMBUSTION

La temperatura máxima que se obtiene en la cámara de combustión, es una variable que está limitada, tanto por los requerimientos de calor para que se lleve a cabo el proceso en cuestión, como por las pérdidas de calor del equipo a los alrededores. Al igual que en el punto anterior, ayuda a determinar el tipo de materiales de construcción (metálicos ó no metálicos), y sus costos.

La temperatura máxima en la cámara de combustión, en el caso de hornos de tipo convencional, puede determinar el arreglo de los tubos, por ejemplo, si las temperaturas son mucho muy elevadas (entre 2100-2300°F aproximadamente), lo recomendable es un arreglo del tipo vertical debido a que, como la mayoría de las veces, dichos tubos son de materiales metálicos, se puede presentar una disminución de sus propiedades mecánicas (72), disminuyendo el tiempo de vida útil del equipo.

## 5.7 MAXIMA CAIDA DE PRESION

Otra variable crítica importante en los procesos de altas temperaturas, es la máxima caída de presión que puede existir en un equipo.

La máxima caída de presión debe ser la mínima que garantice, que no exista la posibilidad de que el material de proceso quede estancado en un punto dado del equipo, por una elevada caída de presión.

En hornos convencionales (72), se puede reducir la caída de presión, del fluido de proceso dentro de los tubos, mediante la disminución del número de vueltas, y conexiones que tenga que recorrer el fluido de proceso, a lo largo de los tubos.

En lechos fluidizados, se debe asegurar una caída de presión del fluido ascendente igual o mayor al peso del sólido fluidizado a fin de que la fluidización se presente.

Si no se cumplen estos requerimientos tanto en hornos convencionales como en fluidizados, la eficiencia del proceso se reduce significativamente.

## 5.8 MAXIMA Y MINIMA VELOCIDAD DE FLUJO DE MASA

La velocidad de flujo de masa del material de proceso, es una de las variables críticas más importantes, puesto que en parte, depende de ésta -

el rendimiento del proceso, ya que esta variable se ve íntimamente relacionada con el tiempo de residencia necesario del material, para alcanzar la eficiencia requerida en el proceso.

La velocidad de flujo de masa tiene un valor determinado por una velocidad máxima y una mínima, basadas en una posible erosión del equipo causada por el material de proceso a alta velocidad, así como por un exceso de energía calorífica recibida por el material de proceso ocasionada por bajas velocidades de éste en el interior del equipo, lo que puede ocasionar resultados insatisfactorios en los productos de proceso, tales como la activación de reacciones indeseables (46), o bien hacer que la reacción principal se convierta en reversible, es decir desplazar el equilibrio de la reacción hacia los reactivos (56).

## 5.9 TEMPERATURA DE PROCESO

Se puede decir que la temperatura de proceso es una de las variables críticas más importantes, debido a que es una variable de la que dependen muchos aspectos, como son la máxima temperatura de la cámara de combustión, materiales a elegir para el equipo, así como la eficiencia con que se lleva a cabo la reacción.

Esto último, se refiere a que, por ejemplo existen procesos en los que con el aumento de la temperatura, igualmente aumenta la eficiencia de reacción, mientras que hay casos, en que un aumento de temperatura no repercute en un aumento del rendimiento de la reacción, y en algunos casos

puede hasta disminuirla (46). Por ejemplo, en el proceso de cloración - de titanio (reacción óxido-reducción), (31,32) como se muestra en la figura 5.5, un aumento en la temperatura de proceso de 808°C a 912°C, repercute en un aumento significativo de la eficiencia de reacción, mientras que con un aumento de la temperatura de 912°C a 951°C, también existe una mayor eficiencia en la reacción, pero tal aumento en la eficiencia no es tan significativo y a bajos tiempos de residencia incluso es menor.

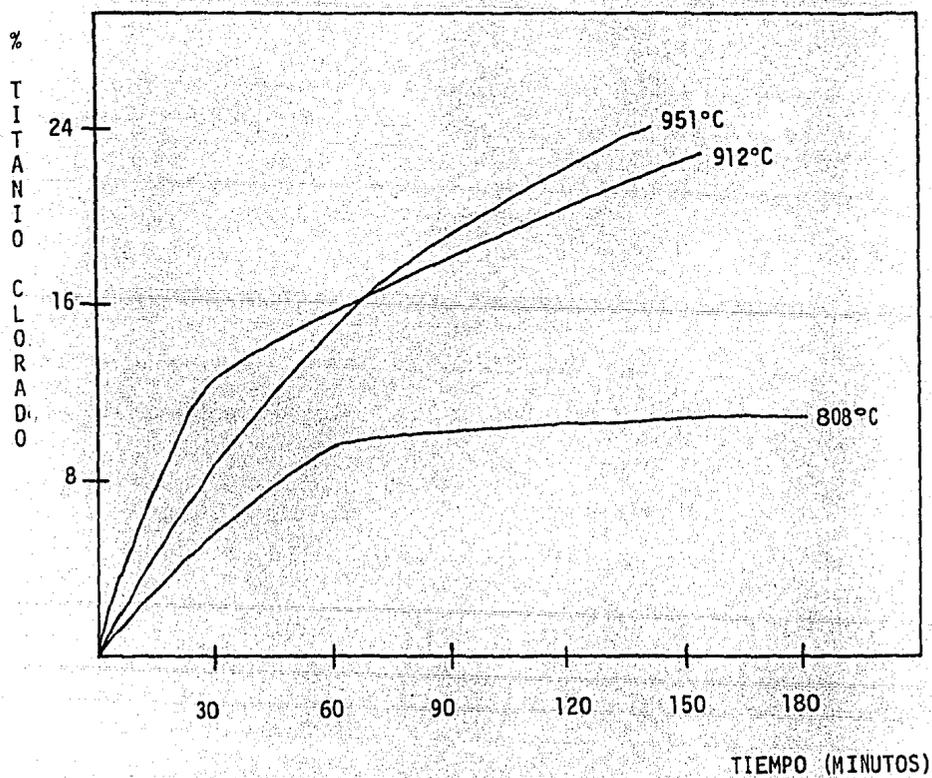
#### 5.10 TAMAÑO DE PARTICULA

El tamaño de partícula, es un parámetro crítico para los procesos, donde al menos uno de los materiales, es sólido, puesto que este parámetro puede definir el grado de conversión de una reacción.

Esto es, si el diámetro de partícula (o tamaño), es relativamente grande, requiere de un tiempo de residencia mayor para que se logren los resultados requeridos, mientras que con un tamaño de partícula pequeña, se puede provocar un sobrecalentamiento de ésta, que puede hacer fundir al material e incrustarlo en el equipo, o bien en el caso de lecho fluidizado, también puede ocurrir el fenómeno de elutriación, con lo cual se obtiene un sólido con baja eficiencia de reacción.

Un ejemplo de los problemas que ocasiona un tamaño de partícula grande, lo constituye el hollín que acompaña a los gases de combustión de carbón, en donde el hollín representa carbón no quemado, es decir, disminuye la eficiencia de reacción. Este problema se presenta en forma similar en -

FIGURA 5.5  
EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA  
DE CLORACION DE TITANIO



combustibles líquidos como en el caso del petróleo.

En el caso de hornos rotatorios, el tamaño de partícula de todos los sólidos en general, debe ser lo más uniforme posible, ya que de lo contrario se tiende a formar subcapas como se observa en la figura 4.11a, con lo que las partículas intermedias pueden quedar aisladas térmicamente dentro del horno y bajar el rendimiento del proceso (56).

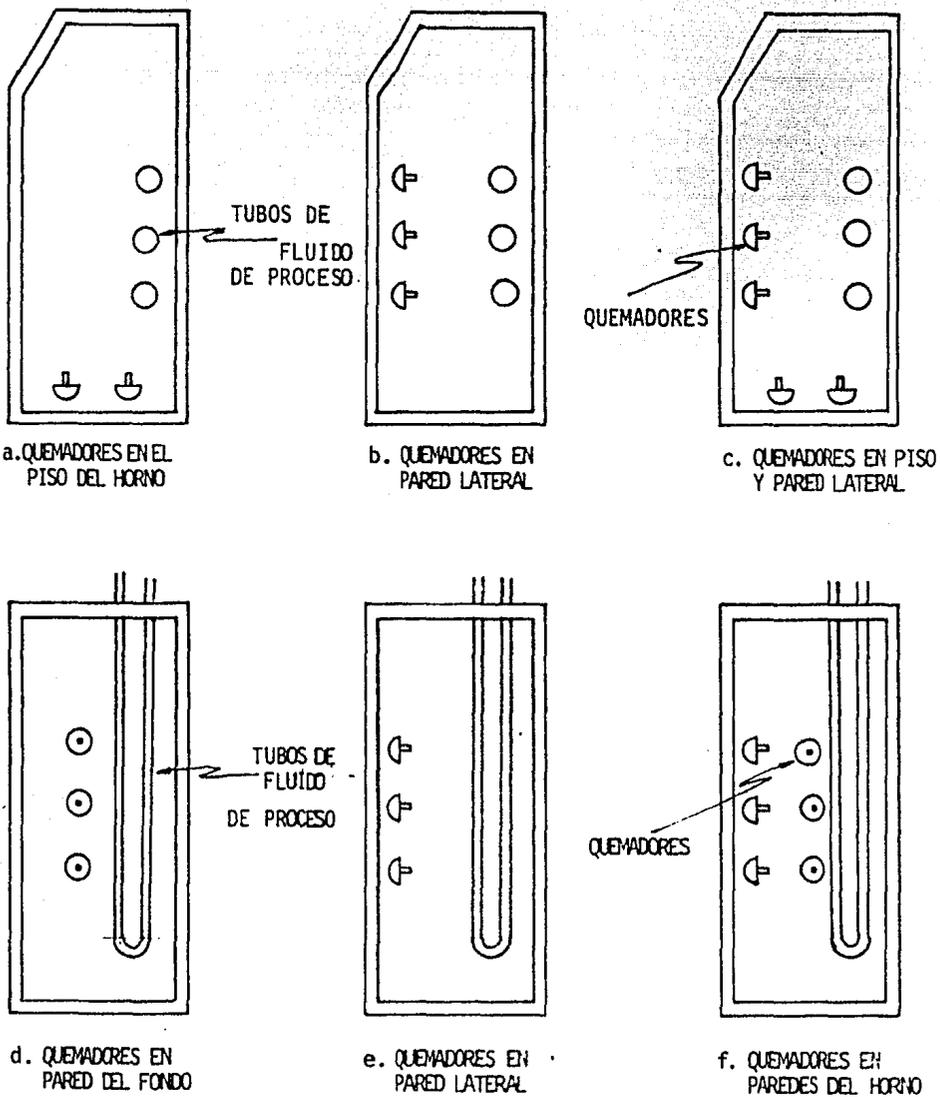
### 5.11 DISTRIBUCION DE QUEMADORES

La distribución de quemadores en un horno, es una variable crítica, ya que dependiendo de la distribución elegida, se puede lograr un máximo de utilización del calor generado en estos quemadores.

Así, en el caso de hornos de tipo convencional, se ha observado (24), que con una colocación de los quemadores en el piso de horno, como se muestra en la figura 5.6, se logra una mayor utilización del calor generado; mientras que en hornos de tipo rotatorio principalmente, los quemadores son colocados de tal forma que los gases de combustión viajen en sentido contrario al flujo del material de proceso, con lo que se obtiene una mayor recuperación de calor.

Se ha observado (17,60), que el tener los quemadores en una parte alejada de donde se encuentra el reactor de alta temperatura, aumenta la eficiencia, en cuanto a calor recuperado, que si se colocan en los quemadores en el horno propiamente dicho, como se observa en la figura 4.22.

FIGURA 5.6  
DIFERENTES ARREGLOS DE QUEMADORES EN UN HORNO



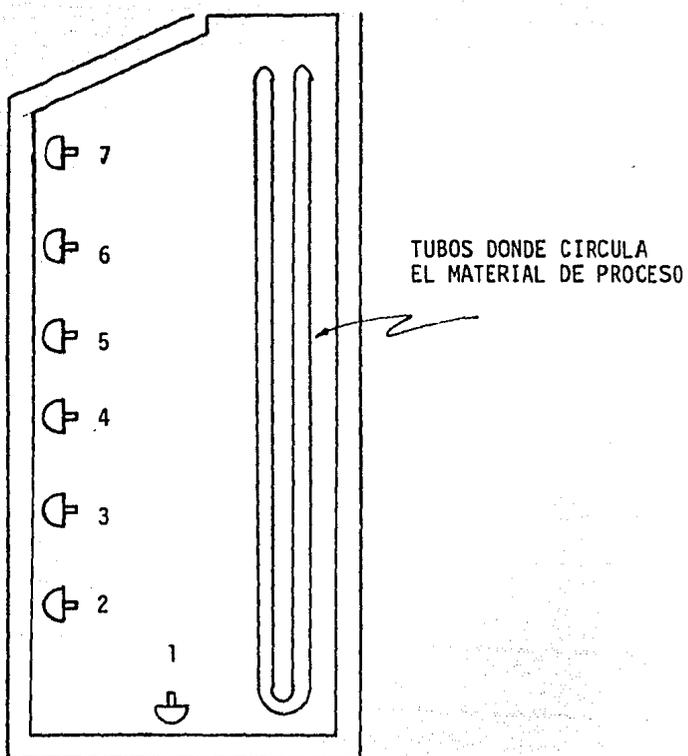
Así, en el caso de hornos tipo convencional, se ha observado (24), que con una colocación de los quemadores en el piso del horno, se logra una mayor utilización del calor generado, como se muestra en la tabla 5.2, de acuerdo al arreglo de quemadores en las paredes del horno o una combinación entre el piso y la pared del horno mostrado en la figura 5.6.

TABLA 5.2  
TABLA COMPARATIVA DE EFICIENCIA  
DE UN HORNO DE ACUERDO AL ARREGLO  
DE SUS QUEMADORES

TOTAL DE CALOR GENERADO MMBTU/HR	EFICIENCIA TERMICA (%)	* DISTRIBUCION DE CARGA (%)						
		1	2	3	4	5	6	7
32.6	57.8	50	40	10				
32.6	54.2		40	30	20	10		
49.0	53.5	50	40	10				
49.0	49.8		40	30	20	10		
49.0	54.0	70	30					
49.0	54.4	100						
49.0	46.5		20	20	20	20	20	
49.0	42.7			10	20	30	40	
49.0	47.6	70						30
49.0	42.6	50						50
73.4	48.3	50	40	10				
73.4	44.6		40	30	20	10		

(\*) LOS NUMEROS REPRESENTAN LA DISPOSICION DE LOS QUEMADORES  
DE ACUERDO A LA FIGURA 5.7

FIGURA 5.7  
DISPOSICION DE LOS QUEMADORES EN UN HORNO  
CONVENCIONAL DE ACUERDO A LA TABLA 5.2



## CAPITULO 6

### CRITERIOS DE SELECCION Y DISEÑO PARA HORNOS DE REACCION

El presente capítulo trata sobre los criterios de selección y diseño para hornos de reacción. La selección y diseño de los equipos de proceso en general, esta apoyada en criterios de selección y diseño que han sido recopilados con base en la experiencia con equipos similares a través del tiempo.

Así mismo, la selección y diseño del equipo se hace considerando las condiciones que prevalecen en el equipo durante la operación, y las bases de diseño para el proceso, que constan de entre otros datos de, la cantidad de producto a obtener, condiciones de presión y temperatura de diseño, códigos de construcción, etcetera.

Para seleccionar y diseñar un equipo, se requiere de una serie de datos físicos, químicos, termodinámicos, etcetera, tanto de los materiales de proceso como de los productos. Estos datos se pueden obtener de la literatura ó pueden ser obtenidos experimentalmente. En el primer caso el uso de correlaciones, gráficas, nomogramas, etcetera, es lo común. Si esta forma de obtener datos no resulta satisfactoria por tener elevados márgenes de error ó por que la información para los compuestos de interés no se encuentra disponible, es necesario evaluar las propiedades a nivel experimental, para lo que se requiere que las condiciones del experimento se asemejen lo más posible a las condiciones que van a prevalecer durante el proceso, con el fin de reducir el intervalo de incertidumbre en cuanto a la evaluación de propiedades.

En las siguientes secciones se presentan los criterios de selección y diseño aplicables a los hornos de reacción que en este trabajo se manejan.

## 6.1 CRITERIOS DE SELECCION PARA HORNOS DE REACCION

En la tabla 6.1 se muestran los principales criterios de selección de hornos de reacción a altas temperaturas, cada uno de estos criterios es descrito a continuación.

### 6.1.1 ESTADO FISICO DEL MATERIAL A PROCESAR

El estado físico en el que se encuentra la materia prima, es el primer punto que se debe considerar para seleccionar el equipo a utilizar; ya que dependiendo de éste, los materiales pueden ser

TABLA 6.1  
CRITERIOS DE SELECCION DE  
EQUIPO A ALTA TEMPERATURA

	HORNO CONVENCIONAL	HORNO ROTATORIO	HORNO L. FLUIDIZADO
ESTADO FISICO DEL MATERIAL	LIQUIDO, GAS SUSPENSION	SOLIDO, SUSPENSION	SOLIDO, SUSPENSION
TIPO DE CALENTAMIENTO	INDIRECTO	DIRECTO O INDIRECTO	DIRECTO O INDIRECTO
TAMAÑO DE PARTICULA DE MATERIAL SOLIDO	-	PEQUEÑO ME DIANO GRAN DE	MEDIANO
AUMENTO DEL TAMAÑO DE PARTICULA	-	INDESEABLE	INDESEABLE
DISMINUCION DEL TAMAÑO DE PAR- TICULA	-	DESEABLE	INDESEABLE
MANEJO DE SUSPENSIONES	SATISFACTO.	SATISFACTO.	SATISFACTORIO
MANEJO DE FLUIDOS	CONVENIENTE	-	-
CONTACTO ENTRE FASES	-	SATISFACTO.	EXCELENTE
FLEXIBILIDAD DE LA OPERACION	SATISFACTO. EN OCASIONES	SATISFACTO.	EXCELENTE
MANTENIMIENTO	PERIODICO	NO PERIODICO	NO PERIODICO
REEMPLAZO DE PARTES	SENCILLO	DIFICIL	SENCILLO
COSTO DEL EQUIPO	INTERMEDIO	ALTO	BAJO

manejados de una manera más adecuada en un tipo de horno u otro.

Por ejemplo, el tipo de horno convencional, se utiliza principalmente para el manejo de materiales fluidos (líquidos ó gases), ya sea que se utilizen tubos con diámetros relativamente pequeños, que los sólidos pueden fácilmente obstruir. Mientras que para materiales tipo sólido se utilizan los hornos tipo rotatorio y - actualmente estan tomando mayor auge los hornos tipo lecho fluidizado; los cuales presentan diversas ventajas respecto a otros hornos.

#### 6.1.2 TIPO DE CALENTAMIENTO

Cuando se requiere que los productos de la reacción no se encuentren contaminados con sustancias extrañas como partículas de carbón, el calentamiento indirecto es el adecuado, pues en caso de que el calentamiento sea directo los productos de la combustión, se encuentran en contacto con los materiales de proceso y esto disminuye su pureza. Así, dependiendo de las características deseadas del producto se puede seleccionar el tipo de horno más conveniente, ya que el lecho fluidizado y el horno rotatorio operan tanto con calentamiento directo como indirecto, mientras que el horno convencional solo opera con calentamiento indirecto.

### 6.1.3 TAMAÑO DE PARTICULA DE MATERIALES SOLIDOS .

Cuando el material de proceso es sólido, el tamaño de partícula que se maneja es importante.

No se consideran los cambios previos en el tamaño de partícula - como consecuencia de, por ejemplo, molienda ó sinterización, para reducción y aumento de tamaño respectivamente; solo se describe la selección en base al tamaño que tiene la partícula cuando es manejada en el horno y el tipo de horno más conveniente para dicho tamaño de partícula.

En general, el tamaño de partícula debe estar en un intervalo - tal que no sea muy grande que ocasione que la reacción se lleve a cabo solo en la superficie de la partícula, reduciendo el grado de conversión, y que no sea tan pequeño que puedan provocar - problemas tales como aglomeraciones, arrastre, etc.

En un horno rotatorio, se pueden manejar tanto partículas grandes como pequeñas, con mayor eficiencia en la reacción en estas últimas, ya que debido al constante movimiento del horno todas - las partículas están en contacto más íntimo con los gases de com bustión y entre sí.

Con un horno de lecho fluidizado, el tamaño de la partícula no - puede ser demasiado grande, debido a la velocidad que se requiere

en los gases de fluidización para que llegue a suspender el sólido. Tampoco puede ser muy pequeña, ya que con partículas finas se observan grandes pérdidas por el fenómeno de elutriación.

Como se puede apreciar, el equipo más conveniente para manejar - casos extremos en tamaño de partícula, es el horno rotatorio. Sin embargo, ya sea horno rotatorio ó de lecho fluidizado, el tamaño de partícula debe ser lo más uniforme posible, para evitar efectos que alteren la eficiencia del proceso.

#### 6.1.4 CAMBIO DEL TAMAÑO DE PARTICULA

Cuando se presentan cambios en el tamaño de partícula de los materiales, al transcurrir la reacción, el equipo a utilizar debe ser capaz de seguir operando sin problemas. En general, existen dos posibilidades, que aumente de tamaño la partícula, ó bien - que disminuya que es lo que generalmente ocurre.

Para el caso de que se presente un aumento en el tamaño de partícula, lo más recomendable, es el uso de hornos de tipo rotatorio, los cuales tienen mayor facilidad para el manejo de sólidos de - tamaño relativamente grande comparado con los lechos fluidizados.

Para cuando en el proceso, ocurre una disminución en el tamaño - del sólido, lo más utilizado, ha sido el lecho fluidizado (46,60), donde en ocasiones, esta misma disminución del tamaño ha servido

para clasificar el producto de la reacción..

Un ejemplo claro de este fenómeno es el ocurrido durante la calcinación del sulfato de calcio dihidratado (52), donde el material al ir transcurriendo la reacción reduce de cuatro a siete veces su tamaño original.

Así, en términos generales, un aumento de tamaño de partícula es indeseable y ocasiona:

- Problemas en la operación de hornos de lecho fluidizado al requerir mayor velocidad en los gases de fluidización para que se logre ésta.
- En hornos rotatorios no se afecta significativamente la operación, pues estos hornos manejan partículas de tamaño relativamente grande.

Por otro lado, la reducción del tamaño de partícula trae como consecuencia:

- En el lecho fluidizado, problemas de arrastre, pero que se pueden solucionar ó aprovechar como se mencionó anteriormente.
- En el horno rotatorio, al reducirse el área de la partícula, se presenta mayor área para el contacto sólido-sólido que incrementa la eficiencia de la reacción.

#### 6.1.5 MANEJO DE SUSPENSIONES

Cuando se trabaja con suspensiones, al entrar éstas al equipo, el disolvente se evapora debido a las temperaturas que prevalecen; así, el manejo de materiales generalmente se convierte paulatinamente en manejo de sólidos. Esto trae como consecuencia que el horno convencional solo se pueda utilizar cuando el disolvente no se evapora, pues en caso contrario se taponarían los tubos.

Por otro lado, lo más conveniente, es la utilización de hornos rotatorios y de lecho fluidizado.

#### 6.1.6 MANEJO DE FLUIDOS

Cuando el material de proceso es un fluido, el horno a utilizar es el convencional, que fué ideado para este tipo de material.

#### 6.1.7 CONTACTO ENTRE FASES

Cuando el contacto entre fases es de vital importancia en el proceso para aumentar la eficiencia de la reacción, la utilización de un horno de lecho fluidizado es lo más conveniente, aunque el horno de lecho fluidizado, ya que el fluido entra en contacto con toda la superficie del sólido, la eficiencia de la reacción aumenta; mientras que en los hornos rotatorios, debido al contacto

con toda la superficie del material de proceso con lo que se disminuye la eficiencia de la reacción.

#### 6.1.8 FLEXIBILIDAD EN LA OPERACION DEL HORNO

Es conveniente seleccionar el tipo de horno que opere satisfactoriamente en un intervalo considerable de niveles de carga, tanto térmica como del material. Esto es:

- En el lecho fluidizado, es relativamente fácil variar la - carga de material, ya que con el aumento ó disminución en - la velocidad del gas de fluidización se compensa el efecto de la variación de la carga.
- En el horno rotatorio si se aumenta la carga del material, debido a que la velocidad de rotación esta fija, la eficiencia de la reacción se ve disminuida debido a la relativa i-  
neficiencia en el contacto sólido-gas que se obtiene; en el caso de disminuir la carga del material, la eficiencia de -  
reacción aumenta debido al mejor contacto sólido-gas.
- En el último caso, horno convencional, el aumento en la carga de material ocasiona una cida de presión considerable, -  
loque no es conveniente; mientras que una disminución en -  
la carga puede originar daños mecánicos sobre los tubos así como alteraciones en el producto del proceso.

Así, el horno con mayor flexibilidad en la operación es el de le

lecho fluidizado, seguido por el rotatorio y el convencional.

#### 6.1.9 FACILIDAD DE MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO DE PARTES

Mientras más fácil sea el darle mantenimiento a un equipo éste es más económico, además, un equipo bien seleccionado debe tener como característica un espaciamiento bastante largo entre periodos de mantenimiento, las partes de reemplazo deben ser del tipo más estandar posible para que no se tengan que fabricar cada vez que sean requeridas y eleven los costos.

El horno rotatorio por tener un gran número de partes móviles tiende a averiarse con más frecuencia por lo que su mantenimiento es más periodico; así mismo, las partes móviles son de una construcción más compleja que las fijas, por lo que las refacciones no son susceptibles de fabricarse fácilmente.

En el caso del lecho fluidizado, ya que no cuenta con partes móviles, la construcción de las refacciones puede hacerse en el taller de la planta; además, el mantenimiento no es requerido periodicamente.

El reemplazo de partes en el horno convencional es relativamente fácil ya que estas pueden ser construidas ó ensambladas en el taller; la limpieza se debe hacer periodicamente pues las incrustaciones dentro de los tubos pueden ser tan significativas que se -

llega a obstruir

#### 6.1.10 COSTO DE EQUIPO

Existen contados procesos, en los cuales se pueden seleccionar - entre dos ó más tipos de hornos, es decir que el proceso sea fac - tible de llevarse a cabo en dos equipos diferentes.

Sin embargo, cuando, se encuentre esta situación, se puede selec - cionar el equipo con base en los costos del mismo; estas situa-- ciones se presentan principalmente entre hornos rotatorios y de lecho fluidizado, por el manejo de sólidos, ó bien puede darse - el caso en hornos convencionales y fluidizados por el manejo de sólido en suspensión.

Las características propias de cada tipo de horno, hacen que re- quieran de ciertos subsistemas, que pueden elevar en un momento dado el costo del equipo; esto es, un horno rotatorio requiere - de un sistema motriz que produzca el movimiento, mientras que el lecho fluidizado y el horno convencional no lo requieren.

Por otro lado, el lecho fluidizado requiere de un distribuidor - de gas que en los otros casos no es necesario.

Cuando se maneja un horno convencional, la circulación de los - fluidos de proceso normalmente se efectúa utilizando un sistema

de bombeo ó compresión, que los otros dos tipos no utilizan.

En términos generales, el costo del equipo para una operación es específica depende del equipo auxiliar requerido y en general aumenta en el siguiente orden:

- Horno tipo lecho fluidizado
- Horno tipo convencional
- Horno tipo rotatorio

## 6.2 CRITERIOS DE DISEÑO DE HORNOS

Una vez seleccionado el tipo de horno que se adecúe más a los requerimientos del proceso, se deben tomar en cuenta, ciertos criterios para su diseño, tales criterios se pueden dividir en dos grupos. Un grupo de criterios generales, los cuales se aplican a cualquier tipo de horno, y otro grupo de criterios específicos que dependen del tipo de horno seleccionado.

A continuación se explica en que consiste cada uno de estos grupos de criterios de diseño.

### 6.2.1 CRITERIOS GENERALES

Como se indicó, los criterios generales son los que se toman en cuenta para todos los tipos de hornos, entre éstos están:

- Máxima temperatura en el horno, y forma de calentamiento
- Caída de presión
- Equipos periféricos requeridos
- Tiempo de residencia y masa de material a procesar

#### A. MAXIMA TEMPERATURA DEL HORNO Y FORMA DE CALENTAMIENTO

Es importante conocer la máxima temperatura que se espera tener en la operación, así como el tipo de calentamiento que requiere el material, como puede ser directo ó indirecto, si es uniforme a lo largo del horno, ó si requiere de un calentamiento gradual, etcetera.

El conocer estos datos así como el tiempo de vida útil del equipo, da la pauta para elegir los materiales de construcción del horno, a fin de que éstos contemplen las características necesarias para que el horno tenga un buen funcionamiento. Por ejemplo, si en un proceso se selecciona un horno tipo rotatorio y con calentamiento indirecto, la temperatura de la cámara de combustión debe ser mayor que si el proceso fuera calentado en forma directa, debido a que la transferencia de calor no es tan efectiva como en el calentamiento directo, sin embargo a la temperatura requerida en el horno, posiblemente necesite materiales de construcción y aislantes y/o refractarios especiales que pueden elevar en forma drástica los costos del equipo.

## B. CAIDA DE PRESION

Un aspecto importante a considerar en el manejo de materiales a través del horno es el de la caída de presión. Como en todo equipo se recomienda que la caída de presión sea mínima, ya que de lo contrario el costo del transporte de los materiales se ve incrementado, además de que se pueden presentar problemas de operación. En el caso de que el horno requiera de accesorios internos, la disposición de éstos debe de hacerse de manera que se disminuya al mínimo la incidencia de las corrientes sobre ellos y se provoque una disminución en la presión. La disposición de manparas debe hacerse de tal manera que se asegure la mayor turbulencia posible y que se reduzcan los puntos muertos.

Con un horno de lecho fluidizado se tiene una caída de presión considerable, con respecto a los hornos convencionales y rotatorios debido a que el gas de fluidización pierde presión al entrar en contacto con la fase sólida.

Cuando se manejan hornos convencionales se deben de evitar en lo posible, retornos, codos, reducciones, etcetera, para dar las menores caídas de presión posible.

En un horno rotatorio la caída de presión observada es baja ya que la corriente de gas solo tiene que vencer la resistencia que presentan las paredes del horno al flujo, pues la resistencia

que presenta el material sólido es mínima..

### C. EQUIPOS PERIFERICOS REQUERIDOS

Entre menos equipos se requieren en la operación y control del -  
horno éste es más económico, los periféricos que sean indispensa  
bles deben ser económicos y fácilmente adquiribles en el mercado  
con la excepción del quemador, ya que se deben ponderar dos as--  
pectos, el alto costo inicial que puede tener uno muy sofisticado  
que produzca una alta eficiencia en la reacción ó un quemador  
de bajo costo cuya eficiencia no sea muy alta.

En cuanto a la colocación de estos periféricos es importante ob-  
servar donde provocan menores problemas (de caída de presión, so  
brecalentamiento), y donde pueden obtenerse mayores beneficios,  
como en el caso de mamparas que estratégicamente colocadas oca-  
sionan turbulencia ó como en el caso de quemadores, que dependien  
do de su colocación a nivel del piso ó a diversas alturas provo-  
can una mayor eficiencia en la distribución de la energía genera  
da (24).

### D. TIEMPO DE RESIDENCIA Y MASA DE MATERIAL A PROCESAR

Para conocer el tiempo de residencia para un proceso determinado,  
se debe tener presente que éste depende del material, del diáme-  
tro de partículas sólidas y de la cinética de la reacción. Al

conocer estos datos se puede tener un valor estimado de que tanto tiempo se requiere para completar la reacción, por ejemplo, - si se trata de un material no poroso ó de alta conductividad no se requiere de un gran tiempo de residencia, mientras que pasa - lo contrario con un material no poroso o de baja conductividad, aunque el dato correcto se conoce con la cinética de la reacción. Si ya se tiene elegido el tipo de horno, para completar el tiempo de residencia de la reacción se puede manejar las dimensiones de éste, haciendolo relativamente pequeño, por ejemplo, en el -- proceso de elaboración del cemento se utilizan hornos rotatorios, si este proceso es el seco, se recomienda un horno de aproximadamente 50 m, mientras que si se utiliza el proceso húmedo el horno puede llegar a medir 100 a 200 m (36). Los hornos de tipo lecho fluidizado son los que requieren de un menor tiempo de residencia, debido a lo íntimo del contacto entre fases; en escala - de eficiencia, en cuanto al tiempo de residencia, el siguiente - horno es el rotatorio y por último el convencional.

La cantidad de material que se pretende producir en un lapso de tiempo dado determina las dimensiones del equipo seleccionado, - aunque hay que tomar en cuenta que la carga térmica se distribuye mejor en hornos pequeños que en grandes, lo que sugiere la utilización de varias unidades pequeñas en lugar de una grande para obtener un costo de producción tan bajo como sea posible.

## 6.2.2 CRITERIOS ESPECIFICOS

Despues de considerar los criterios generales de diseño de hornos, es importante revisar los criterios especificos para cada uno de ellos.

### I. HORNO DE LECHO FLUIDIZADO

#### A. ALTURA TOTAL DEL EQUIPO

El horno de tipo lecho fluidizado es el equipo donde el contacto entre fases se ve más favorecido, por lo que su longitud es menor en comparación con los otros equipos considerados en este trabajo, ya que el tiempo de residencia se ve reducido. Si este equipo es muy grande (al manejar grandes volúmenes de reactivos), se pueden presentar algunos problemas relacionados con la caída de presión del gas, ó de sustentación, pero aún así, es común encontrar equipos de este tipo (de grandes dimensiones).

#### B. RELACION LONGITUD/DIAMETRO (L/D) RECOMENDADA

La relación L/D recomendada para este tipo de equipo fluctúa entre 4 y 10.

## II. HORNO ROTATORIO

### A. RELACION LONGITUD/DIAMETRO (L/D) RECOMENDADA

La relación L/D depende tanto de la funcionalidad del equipo como de su estética, las recomendadas están en un rango de entre 4 y 10.

### B. INCLINACION DEL HORNO

La inclinación del horno rotatorio es necesaria para ayudar al desplazamiento del material dentro de él, generalmente se recomienda que sea de 1/4 a 3/4 de pulgada por cada pie de largo del horno.

### C. VELOCIDAD DE ROTACION

Dependiendo de la velocidad de rotación que tenga el horno, el contacto entre fases se puede ver mejorado, para un tipo especial. Como por ejemplo, experimentalmente se ha hallado que la velocidad de rotación que provoca mayor eficiencia en el proceso de calcinación de dióxido de titanio, de cemento y de calcinación de fosfatos son: 4 pies/min, 45 pies/min y 125 pies/min respectivamente.

#### D. VOLUMEN OCUPADO

En general, los hornos rotatorios operan entre el tres y el doce por ciento de su volumen, lleno con el material y el siete por ciento se considera como un nivel de operación normal

### III. HORNOS CONVENCIONALES

#### A. DIAMETRO DEL TUBO

El diámetro del tubo debe seleccionarse dependiendo de la cantidad de fluido que se maneje, así como de la carga térmica a transmitirle a éste. Esto es, para flujos másicos grandes, se requieren diámetros mayores, no obstante es mejor utilizar diámetros pequeños aunque se aumente la longitud del tubo, pues se obtiene una mayor transferencia de calor al incrementarse la turbulencia y una mayor área de contacto.

#### B. ARREGLO DE INTERNOS

La disposición de mamparas debe hacerse de manera que se genere la mayor turbulencia para que se reduzcan al mínimo los puntos muertos. También el arreglo de quemadores debe hacerse de tal forma que se obtenga la mayor eficiencia en la utilización del calor por el material de proceso.

## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1.- Las tendencias en la mejora de la utilización de los recursos energéticos se manifiestan cuando se presentan problemas de encarecimiento de estos recursos.
- 2.- La mayor cantidad de trabajos en cuanto a innovación de equipos y procesos se manifiesta principalmente en investigación aplicada

y pocos en investigación básica, ya que las empresas particulares tienen más recursos, que los laboratorios de investigación en las universidades.

- 3.- La mayor parte de las patentes proporcionan la información fragmentada, con el objeto de no violar los derechos de autor, con esto no se conocen condiciones así como consecuencias de los aparatos ó innovaciones que se proponen, en investigación básica, generalmente se presentan los resultados de las investigaciones y de algunos casos analizados.
- 4.- La mayor parte de la investigación básica pertenece a institutos ó universidades del bloque socialista, que dificulta el acceso a ellas y en el mejor de los casos no hay traducciones al idioma inglés.
- 5.- La presencia de revisiones generalmente indica que los trabajos presentados son lo bastante buenos como para hacer el trabajo de la revisión posterior a su publicación, aunque en algunos casos solo conjuntan la información publicada. La publicación de libros sobre el tema es en general muy esporádica.
- 6.- Los principales sectores industriales en los que inciden los equipos de operaciones a alta temperatura detectados en la literatura son: Minerales, Metales, Petróleo, Diseño y características de equipo, Cemento, Productos industriales y lecho fluidizado.

- 7.- La fenomenología de reacciones a alta temperatura está constituida por una gran variedad de procesos individuales que ocurren simultánea ó paralelamente, entre los cuales lo más importantes son: los cambios de fase; la transformación de sólidos, la fenomenología de flamas, la generación de radiación y la transferencia de masa y energía.
- 8.- La diversidad y complejidad de los fenómenos que se suceden en los procesos a alta temperatura han sido los principales obstáculos para hacer modelos matemáticos que los representen, no obstante aunque no se consideraron en este trabajo, se puede encontrar en la literatura ecuaciones que tratan de describir a algunos de los fenómenos.
- 9.- De los procesos a altas temperaturas, tratados en este trabajo, como son calcinación, combustión y reacciones sólido-sólido y sólido-gas, lo más ampliamente estudiados han sido los procesos de combustión debido en gran parte al hecho de ser éste uno de los medios más utilizados para proveer la energía calorífica utilizada en los procesos a alta temperatura.
- 10.- Para efectuar reacciones a alta temperatura se han venido utilizando los hornos convencionales y los rotatorios, sin embargo el reciente desarrollo de los hornos de lecho fluidizado ha venido desplazando a los hornos rotatorios debido a su versatilidad de operación y de manejo de materiales. Por otro lado, los hornos

tubulares a alta temperatura se encuentran en etapa de desarrollo, teniendo los principales avances en reacciones de combustión y reacciones sólido-líquido y sólido-gas; por lo que se espera - en los próximos años sus aplicaciones industriales se vean incrementadas rápidamente.

- 11.- Dependiendo del proceso y el equipo, en el cual se lleve a cabo la reacción, se presentan diferentes fenómenos que en un momento dado pueden mejorar o no el rendimiento de la reacción.
- 12.- En ocasiones, se debe recurrir a diferentes arreglos geométricos a fin de producir fenómenos que de otra forma podrían elevar los costos de proceso, tal es el caso, cuando se requiere de un mezclado dentro del horno, en el cual la disposición de las boquillas de alimentación pueden ser de gran importancia. O bien en la separación de los productos del proceso a la salida del equipo.
- 13.- Los equipos tienden en general a aprovechar al máximo el calor generado, de forma que los arreglos de éstos se han ido modificando para obtener la máxima recuperación de calor posible dentro de un equipo dado.
- 14.- En cuanto a los modelos que representan a los procesos a altas temperaturas, se ha observado, que solo existe para procesos específicos, aunque dependiendo de las características del proceso

y equipo, se pueden generar modelos en base a los ya existentes como son el RTAC y el RTFC.

- 15.- Al igual que en los hornos, los constantes cambios realizados en los quemadores tienen como fin el mejorar los fenómenos que en éstos ocurren a fin de obtener un proceso de combustión óptimo.
- 16.- Existen algunas variables así como parámetros que en un momento dado pueden afectar la eficiencia de la reacción principal del proceso o bien el funcionamiento del equipo, entre las más importantes están: la incrustación de sólidos en las paredes de los equipos, las pérdidas de energía por radiación, el taponamiento y erosión de conductos, las temperaturas de proceso, la máxima caída de presión, el tamaño de partícula y la distribución de los quemadores.
- 17.- La experiencia adquirida en cuanto al manejo de hornos a nivel industrial, ha servido de pauta para su posterior selección y diseño, y aunque no existe una guía completa para este fin, los criterios básicos recopilados presentan un panorama general de la forma en que se debe realizar la selección y lo que se debe tener en cuenta para el diseño.

Los autores del presente trabajo, recomiendan la continuación del estudio en cuanto a modelos matemáticos y métodos formales para el diseño de hornos para reacciones no catalíticas a altas temperaturas.

## APENDICE A

### TENDENCIAS EN INVESTIGACION Y DESARROLLO DE EQUIPO DE PROCESO A ALTAS TEMPERATURAS Y SUS APLICACIONES INDUSTRIALES

En el presente apéndice se muestran los principales rubros detectados en la literatura sobre hornos y quemadores, se indica la forma de análisis empleada en la información obtenida en cuanto a artículos, patentes, revisiones y libros se refiere. Se presentan las tendencias en investigación a nivel básico y aplicada, detectado en el periodo 1962-1982 a nivel internacional.

#### A.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LAS OPERACIONES A ALTAS TEMPERATURAS

Los equipos principales utilizados en las operaciones a altas temperaturas

son los hornos, estos pueden ser de diferentes tipos como son: rotatorios, convencionales, de lecho fluidizado, etcetera. Un equipo periférico de importancia es el quemador.

## A.2 PRINCIPALES RUBROS DETECTADOS EN LA LITERATURA

Los principales rubros que se detectaron en la literatura sobre el tema hornos y el de quemadores son:

- ALUMINIO
- AMONIACO
- NEGRO DE CARBON
- GAS NATURAL
- DISEÑO, PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE EQUIPO
- DERIVADOS DEL PETROLEO
- FOSFORO
- AZUFRE
- MEZCLA CO-HIDROCARBUROS
- OXIDOS DE NITROGENO
- ACETILENO
- HIDROCARBUROS
- ACERO
- CEMENTO
- LECHO FLUIDIZADO

Debido a sus características similares algunos de estos rubros pueden -

agruparse, por ejemplo, acero y aluminio en metales; derivados del petróleo e hidrocarburos en petróleo; etcetera.

De tal forma que los rubros listados anteriormente se agruparon en:

- 1.- MINERALES
- 2.- METALES
- 3.- PETROLEO
- 4.- DISEÑO Y CARACTERISTICAS DE EQUIPO
- 5.- CEMENTO
- 6.- PRODUCTOS INDUSTRIALES
- 7.- LECHO FLUIDIZADO

### A.3 PRINCIPALES TENDENCIAS DETECTADAS EN LA LITERATURA

La información colectada se presenta en forma gráfica para hornos y quemadores, con el objeto de mostrar la evolución que ha tenido el interés en la investigación básica y aplicada en este tipo de equipo, en los rubros antes mencionados.

A continuación, se presenta la forma de análisis efectuada a la información recopilada, en cuanto de los rubros antes presentados.

#### A.3.1 DISEÑO Y CARACTERISTICAS DE EQUIPO

En la figura A.5, se presentan las tendencias en el diseño y características de horno. Analizando de una forma muy general tal

figura, se tiene una idea de lo que ha sido este rubro en las ac tividades de investigación y desarrollo, por ejemplo en la inves tigación y desarrollo, por ejemplo, en la investigación básica - representada por artículos-, se observa una tendencia en promedio, casi constante, y alta en la producción de éstos, lo que in dica un interés permanente en el periodo analizado, pudiéndose -- considerar un promedio de 10 artículos por año aproximadamente, aunque fué mayor entre el periodo comprendido entre los años de 66 y 67.

En cuanto a la investigación aplicada -representada por las pa-- tentes-, en promedio se observa que en el primer lustro (63-67), existe una elevada producción de patentes con respecto a los lus tros siguientes, lo que indica, primero que en los años de 1966-1967, existía realmente un problema que resolver a corto plazo - en dicho lapso de tiempo, segundo, hasta el año de 1982, los pro blemas aunque presentes, se han logrado resolver con una relativamente baja producción de patentes y en promedio constante.

Así mismo, de manera global se observa en mucho mayor grado la actividad en la investigación básica, que pudo ser ó estar apoya da por planes gubernamentales, como el caso de los Estados Unidos de Norteamérica.

Como resultado de la alta producción de artículos, se da un núme ro elevado de revisiones, lo que habla de una buena calidad de

FIGURA A.1  
TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION  
DE HORNOS AL TRATAMIENTO DE MINERALES

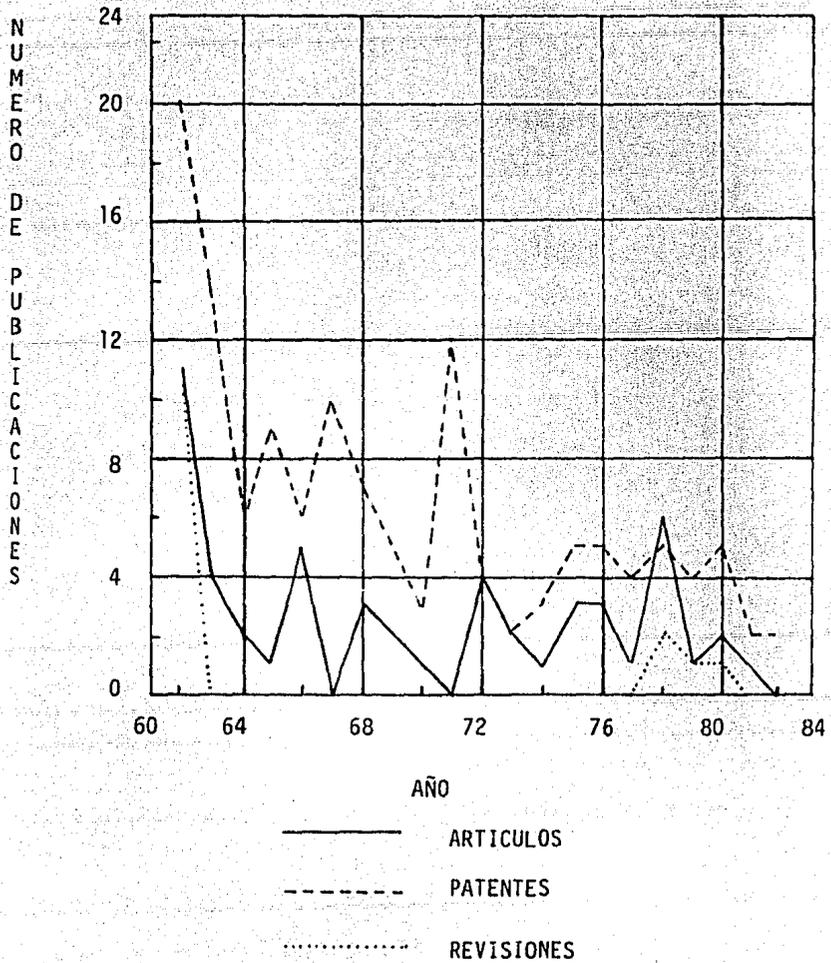
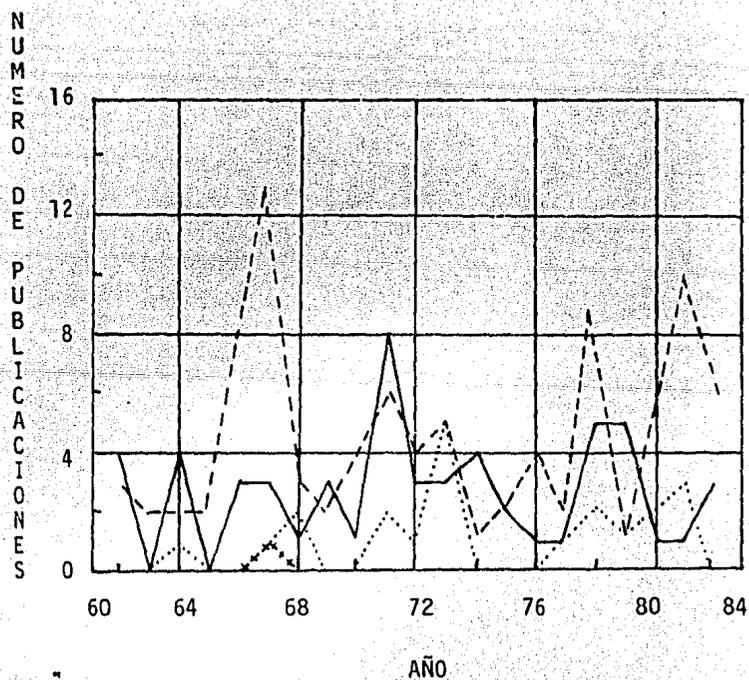
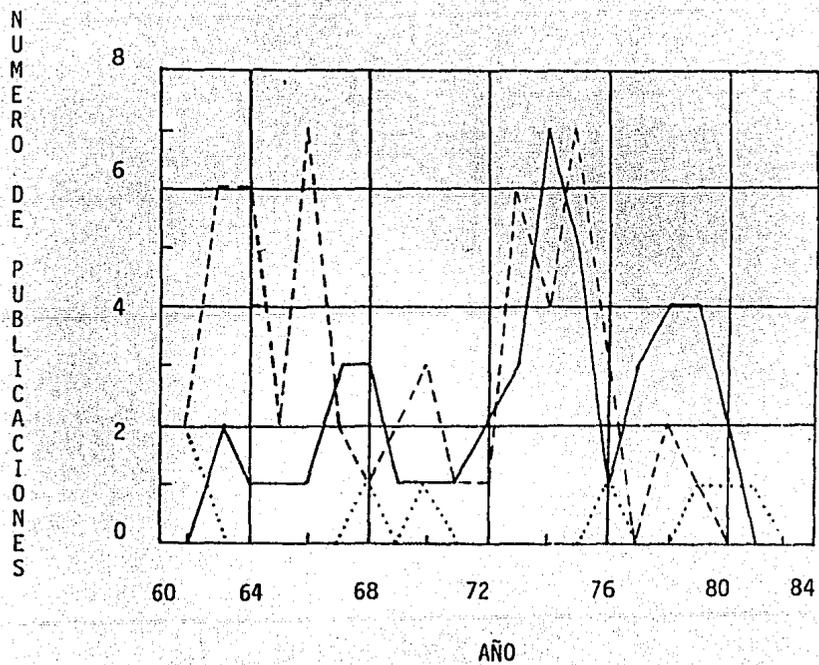


FIGURA A.2  
TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION  
DE HORNOS AL TRATAMIENTO DE METALES



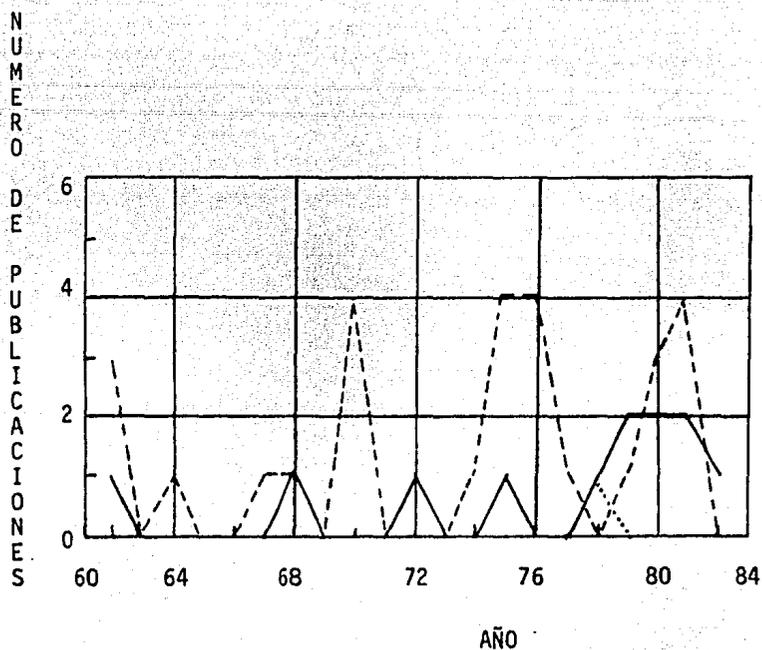
————— ARTICULOS  
 - - - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES  
 + + + + + LIBROS

FIGURA A.3  
TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION  
DE HORNOS EN EL TRATAMIENTO DE PETROLEO



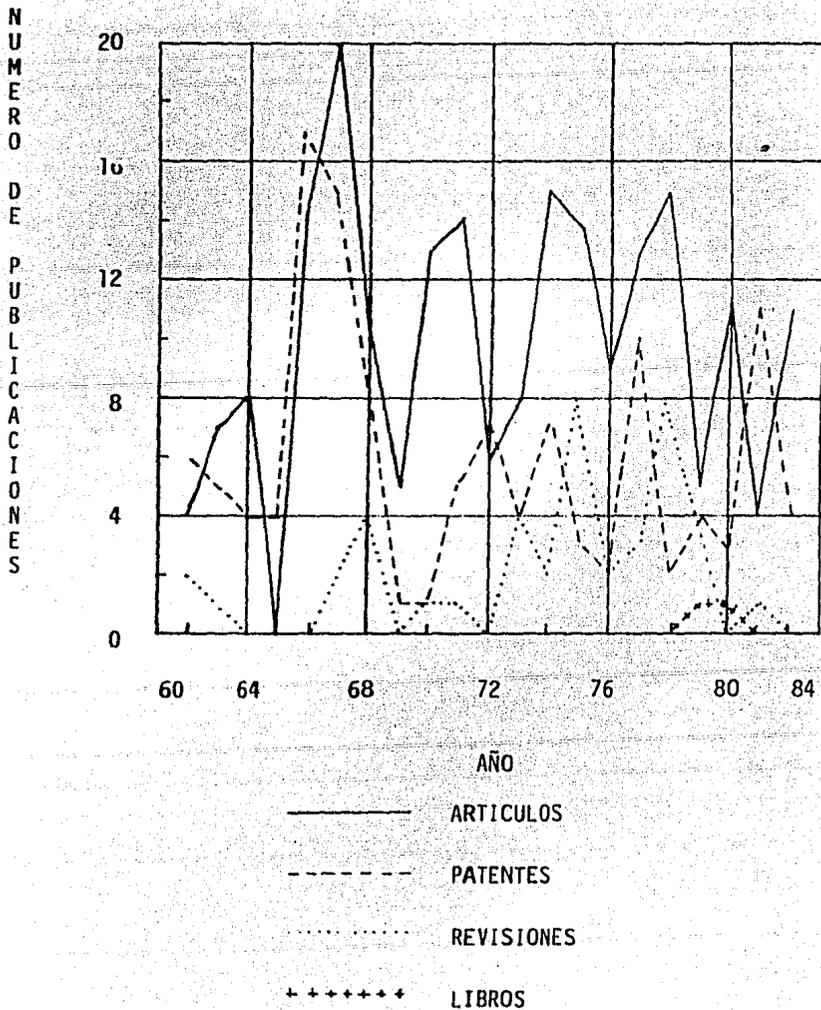
— ARTICULOS  
- - - PATENTES  
..... REVISIONES

FIGURA A.4  
TENDENCIAS DE LAS PUBLICACIONES EN LA APLICACION  
DE HORNOS EN EL TRATAMIENTO DE CEMENTO



————— ARTICULOS  
----- PATENTES  
..... REVISIONES

FIGURA A.5  
TENDENCIAS DE LAS APLICACIONES DEL DISEÑO  
Y CARACTERISTICAS DE EQUIPO (HORNO)



la investigaciones básicas y aplicadas, y en cierta instancia - una buena fuente para iniciar una investigación sobre el tema, - en lugar de realizarlo sobre artículos y patentes. En cuanto a libros, la producción es mínima y solo se da la publicación de - estos hasta fines de los años setentas.

### A.3.2 PRODUCTOS INDUSTRIALES

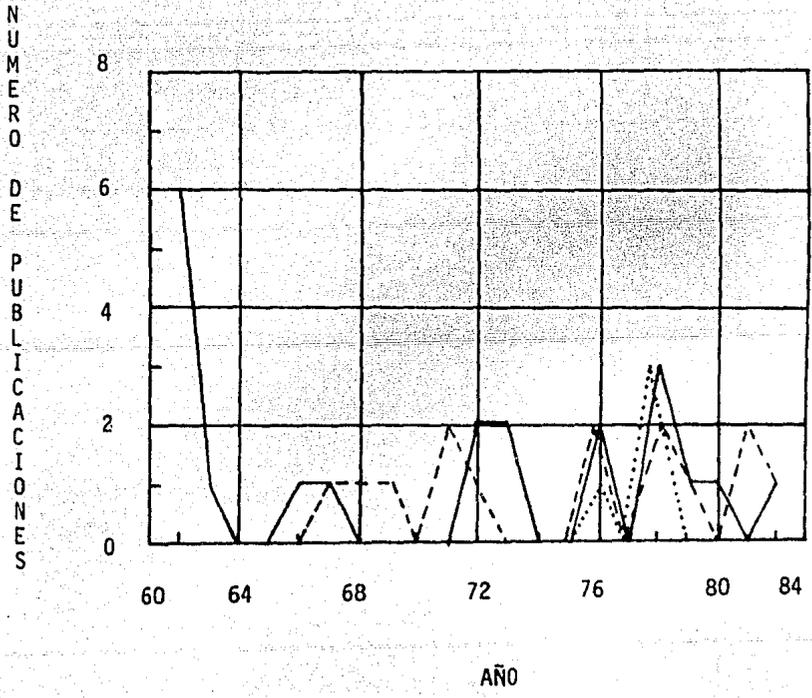
Las tendencias seguidas por la aplicación de hornos en la manu- - factura de procesos industriales, se presentan en la figura A.6.

En forma general, se nota muy poca actividad a lo largo de los - veinte años analizados, llegando a un máximo de 39 publicaciones en todas sus formas (es decir patentes, artículos, revisiones y libros), presentandose la mayor producción en la investigación - básica (54% aproximadamente).

Analizando la información en forma quinquenal, se observa que en la investigación básica, existe una disminución en el interés - por el tema en los primeros dos lustros, aunque continúa un aumento en el interés sobre el tema, en los siguientes lustros lo que puede indicar la necesidad de resolver problemas, aunque mínimos y específicos, en forma prioritaria.

En cuanto a la investigación aplicada, no obstante que se notan aumentos y disminuciones de la producción de patentes, en un --

FIGURA A.6  
TENDENCIAS DE LA APLICACION DE HORNOS EN LA  
MANUFACTURA DE PRODUCTOS INDUSTRIALES



— ARTICULOS  
 - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES

promedio general se puede indicar que es constante, generalizándose a afirmar que se realiza menos de una patente por año (0.75 en promedio), lo que muestra de nuevo un poco de interés existente en el tema.

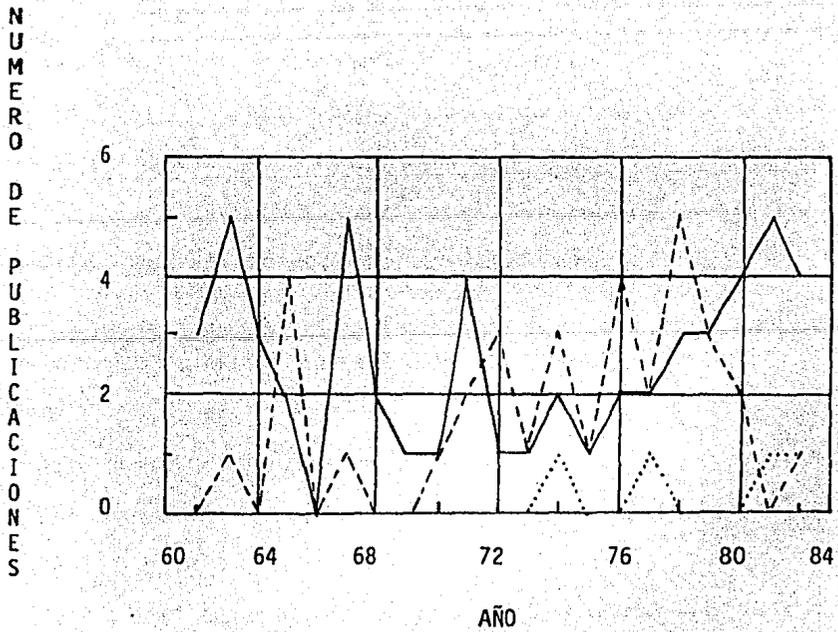
### A.3.3 LECHO FLUIDIZADO

Las tendencias en la aplicación de hornos de lecho fluidizado se presentan en la figura A.7. En esta figura se muestra un panorama de como se ha desarrollado el tema, a lo largo del periodo comprendido entre los años de 1962 y 1982, y que en promedio es constante (4 publicaciones por año aproximadamente).

En cuanto a los artículos (que indica el avance que ha tenido la investigación básica), se observa que en los primeros tres lustros, existe una disminución lo cual puede deberse a los costos tan elevados que deben invertirse en dichos estudios a nivel de escuelas universitarias ó de centros de investigación, no obstante, en el último lustro se observa un fuerte incremento en el estudio de los hornos de lecho fluidizado, lo que puede deberse a los resultados favorables que se obtuvieron en los lustros anteriores.

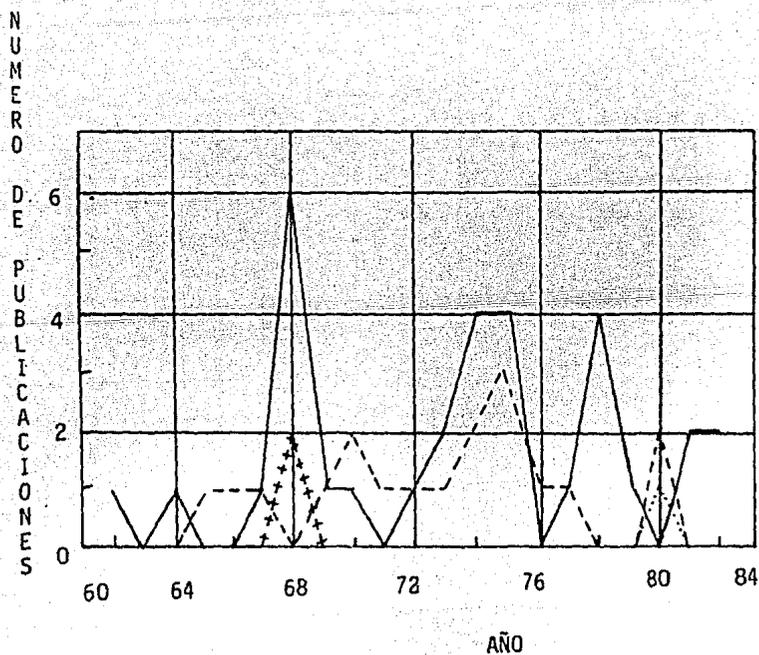
Sobre la investigación aplicada, se observa un desinterés en los primeros dos lustros, que se abate en los siguientes años, y aumenta el número de publicaciones, lo que indica, que los resultados

FIGURA A.7  
 APLICACION DE LOS HORNOS A LA OPERACION  
 DEL LECHO FLUIDIZADO



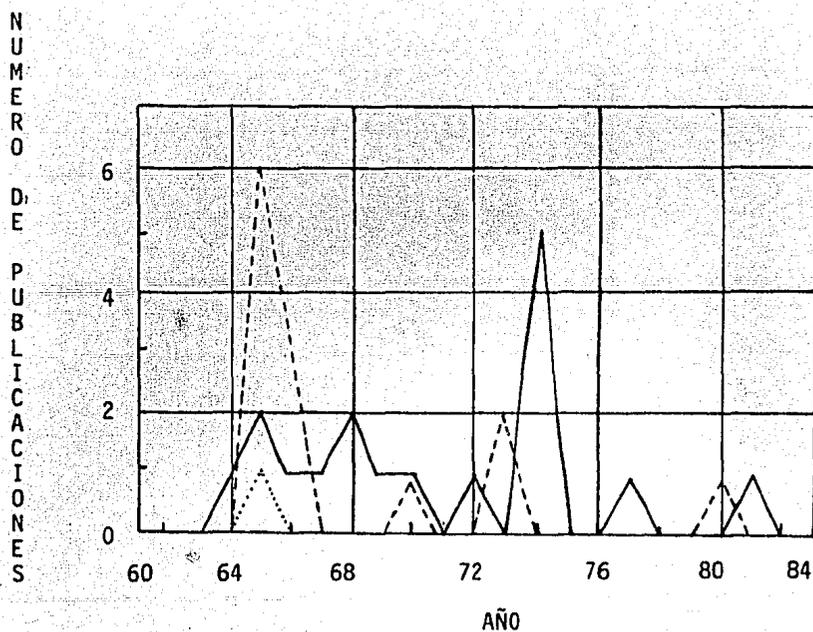
———— ARTICULOS  
 - - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES

FIGURA A.8  
TENDENCIAS DE LAS APLICACIONES DE LOS QUEMADORES  
EN EL TRATAMIENTO Y MANUFACTURA DE MINERALES  
INDUSTRIALES



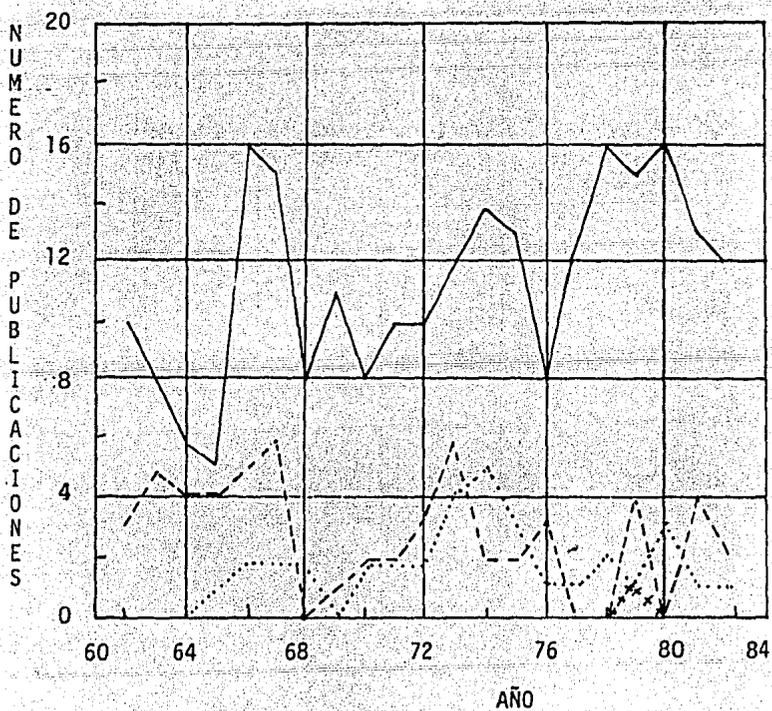
— ARTICULOS  
 - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES  
 + + + + + LIBROS

FIGURA A.9  
PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS TENDENCIAS  
DE LAS APLICACIONES DE LOS QUEMADORES EN EL  
TRATAMIENTO Y MANUFACTURA DE METALES INDUSTRIALES



————— ARTICULOS  
- - - - - PATENTES  
..... REVISIONES

FIGURA A.10  
 PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS TENDENCIAS  
 DE LAS APLICACIONES DE LOS QUEMADORES  
 EN LA INDUSTRIA DEL PETROLEO



————— ARTICULOS  
 - - - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES  
 + + + + + LIBROS

FIGURA A.11  
PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL DISEÑO  
Y LAS CARACTERISTICAS DE QUEMADORES

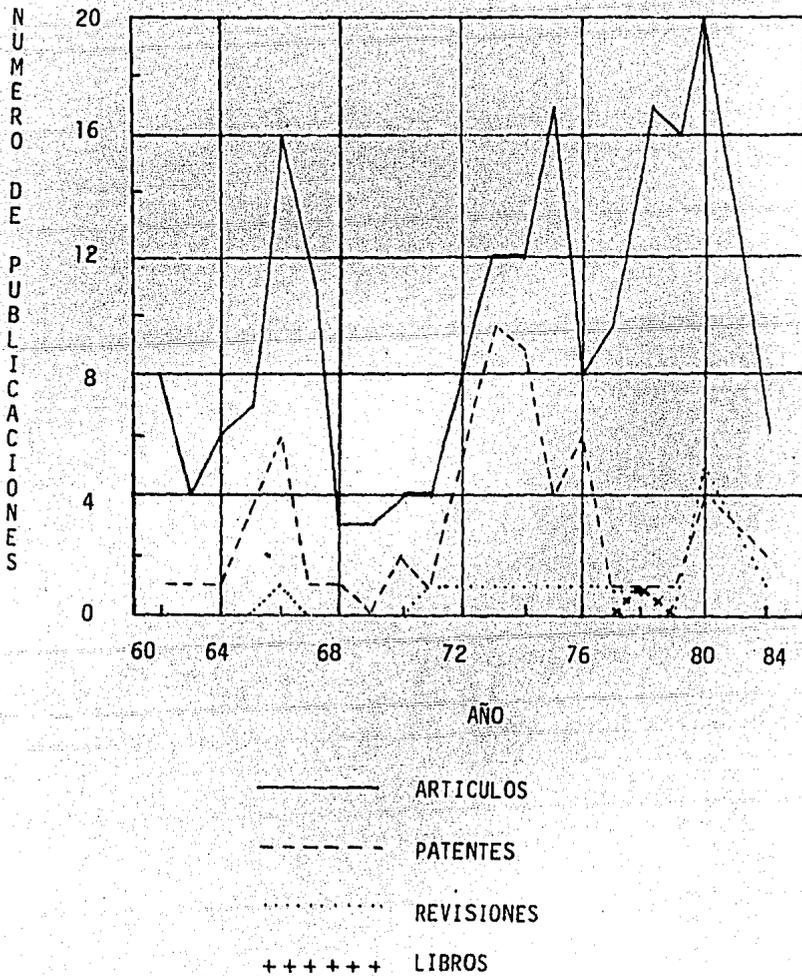
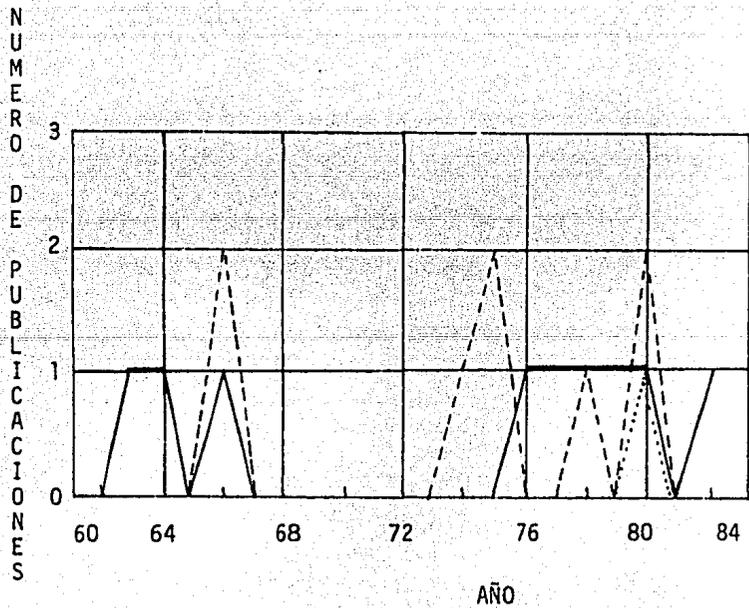


FIGURA A.12  
 PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LAS TENDENCIAS DE  
 LAS APLICACIONES DE QUEMADORES EN LA OBTENCION  
 DE PRODUCTOS INDUSTRIALES



— ARTICULOS  
 - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES

obtenidos tanto por la investigación básica como la misma aplicada, son de interés a nivel industrial, y empieza la industria (investigación aplicada), a realizar estudios basándose en los resultados con anterioridad.

Otra forma en la que se observa el interés que empieza a crecer en torno al tema, son las revisiones que se dan a finales de los años setentas y principios de los ochentas.

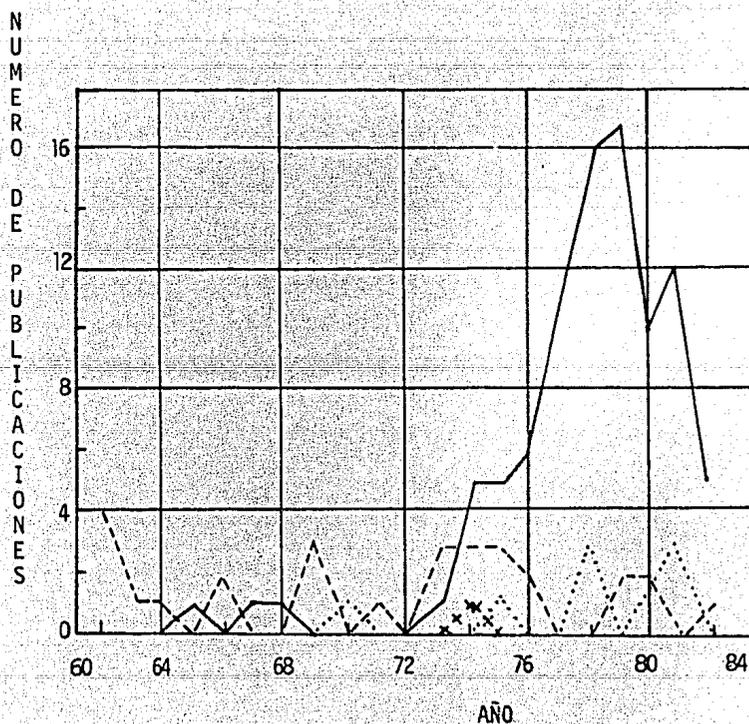
#### A.3.4 LECHO FLUIDIZADO (EN QUEMADORES)

Las tendencias sobre la aplicación de quemadores en operaciones en lecho fluidizado se presenta en la figura A.13.

En esta figura, muestra en cuanto a investigación básica se refiere, un periodo de publicaciones en promedio constante en los años sesentas, en los cuales la publicación anual, es a lo más de un artículo, lo que indica un desinterés mostrado sobre los quemadores para lecho fluidizado, situación que en los años setentas da un giro, pues la investigación básica se incrementa en forma acelerada, hasta un máximo de 17 publicaciones en 1979, esto implica que las investigaciones son vistas con posibilidades de mejoras en cuanto a procesos de lecho fluidizado en operaciones a alta temperatura.

En cuanto a la investigación aplicada en general (y en promedio),

FIGURA A.13  
 PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA APLICACION DE  
 QUEMADORES EN OPERACIONES DE LECHO FLUIDIZADO



————— ARTICULOS  
 - - - - - PATENTES  
 ..... REVISIONES  
 + + + + + LIBROS

en los veinte años estudiados, se nota una constancia, lo que muestra un cierto interés del tema para la industria, y un dato curioso observado, es que en la década de los sesentas en donde se aprecia una elevada producción de artículos, el número de patentes publicadas por año no tiene un aumento, sino al contrario existe una cierta disminución relativa en cuanto a patentes, lo que puede indicar que los estudios básicos realizados producen resultados que aunque buenos (esto se deduce del aumento de la producción de revisiones a fines de los setentas), pueden ser ya del conocimiento de la industria, y por lo tanto no registra novedades interesantes a nivel industrial.

## BIBLIOGRAFIA

- 1º ABDUL, H. K.: JAIN, A.K. ET AL  
35 HARMONIC BEHAVIOUR OF THE RATE OF CATALYTIC OXIDATION OF CO UNDER CYCLING CONDITIONS  
CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE VOL 35, 1980, pp 373-382
- 2º BAKER, R. J. ET AL  
MEASUREMENTS OF THREE VELOCITY COMPONENTS IN A MODEL FURNACE WITH AND WITHOUT COMBUSTION  
ARTICULO DONADO POR EL DR. SALVADOR LOPEZ G.
- 3º BERGGREN, J. C. ET AL  
56 APPLICATION OF CHEMICAL AND PHYSICAL OPERATIONS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED SYSTEM
- 4º BUETERS, K. A.  
A KINETIC THEORY OF GASES APPROACH TO CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN UTILITY FURNACES  
COMBUSTION JAN. 1977 pp 33-40
- 5º DON L., BRUCE GARRETT, ET AL  
DISCRETE SIMULATION METHODS IN COMBUSTION KINETICS  
COMBUSTION AND FLAME 23, 373-379 (1974)
- 6º CHEN M. JAMES & YANG RALPH  
MODELLING AND KINETIC STUDIES OF A ROTARY KILN REACTOR  
TRANS. I. CHEM. E. VOL 58, 1980
- 7º CARBERRY  
CHEMICAL AND CATALYTIC REACTOR ENGINEERING  
MC GRAW HILL, 1977

- 8° CATTERJEE BIMAL H. P. S.  
CALCINATION CHARACTERISTICS OF PETROLEUM COKE  
INDIAN JOURNAL OF TECHNOLOGY VOL 8 OCT. 1970 pp 378-384
- 9° CHAMBERS, L. E. & POTTER, W. S.  
DESIGN ETHYLENE FURNACES: PART I: MAXIMUM ETHYLENE  
HYDROCARBON PROCESSING, JAN. 1974, pp 121-126
- 10° CHAMBERS, L. E. & POTTER, W. S.  
DESIGN ETHYLENE FURNACES: PART III: FURNACE COSTS  
HYDROCARBON PROCESSING, AUGUST 1974, pp 99-103
- 11° COE W. W.  
HOW BURNERS INFLUENCE COMBUSTION  
HYDROCARBON PROCESSING MAY 1981 pp 179-184
- 12° DUMNOT GUY & BELANGER R. PIERRE  
STEADY-STATE STUDY OF TITANIUM DIOXIDE ROTARY KILN  
IND. ENF. CHEM. PROCESS DES. DEV. VOL 17 NO. 2 (1978) pp 107-114
- 13° DURRANT, M. J. & DRAY COTT, A. P.  
IMPROVEMENTS IN CALCINED MAGNESITE AS A MAGNESIUM FERTILIZER  
AGRIC. SCI. CAMB. (1976) 86, pp 543-552
- 14° FILLA, M. & CHIAPPETA, M.  
DESIGN AND PERFORMANCE PREDICTION OF PIROLYSIS FURNACES BY FLUX METHODS  
AND BY THE ZONE METHOD  
ISTITUTO DI CHIMICA INDUSTRIALE E IMPIANTI CHIMICI, UNIVERSITA DI  
NAPOLI (ITALY) pp 969-984
- 15° GEORGE M. ZACYEIRA & LINDA G. SCHNEIDER  
SODIUM HYDROXIDE ASSISTED DESULPHURIZATION OF PETROLEUM FLUID COKE  
FUEL, 1982, VOL. 61, DEC. pp 1260-1266

- 16° HIGHLEY, J.  
FLUIDIZED BED COMBUSTION  
COAL TECHNOLOGY COURSE, MARCH, 1984, pp 1-26
- 17° HIGHLEY, J. ET AL  
THE APPLICATION OF FLUIDIZED COMBUSTION TO INDUSTRIAL FOILERS AND  
FURNACES  
INSTITUTE OF FUEL SYMPOSIUM SERIES pp B3-1 a B3-10, 1981
- 18° KAKUTA M., ET AL  
NEW CALCINING TECHNOLOGY OF PETROLEUM COKE  
AMERICAN CHEMICAL SOCIETY VOL 28 pp 441-444 (1964)
- 19° KAKUTA, M. & TANAKA  
NEW CALCINING TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF COKE WITH LOWER THERMAL  
EXPANSION COEFFICIENT  
CARBON VOL 19 NO. 5 (1981) pp 347-352
- 20° KARIM, G. A.  
ON THE CONSIDERATION OF CHEMICAL KINETICS IN COMBUSTION CALCULATIONS  
JOURNAL OF ENG. SCI. VOL 5 NO. 1 (1979) pp 97-108
- 21° LEE, D. C., ET AL  
MODELLING SO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FLUIDIZED BED COAL COMBUSTORS  
CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE VOL 35, 1980 pp 302-306
- 22° LEFERS, J. B. ET AL  
THE OXIDATION AND ABSORPTION OF NITROGEN OXIDES IN NITRIC ACID IN  
RELATION TO THE TAIL GAS PROBLEM OF NITRIC ACID PLANT  
CHEM. ENG. SCIENCE VOL 35, 1980 pp 295-301
- 23° LEVESNPIEL OCTAVE & PARK DALEUN  
A COMPARISON OF THE PLUME MODEL WITH CURRENTLY USED MODELS FOR  
ATMOSPHERIC FLUIDIZED BED COMBUSTION  
CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE VOL 35, 1980 pp 295-301

- 24° LOFTUS. J., SCHUTT. H. C., SAROFIN. A. F.  
DESIGN OF FURNACES FOR TUBULAR REACTORS  
CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS VOL 63 NO. 7 JUL. 1967 pp 47-54
- 25° LOFTUS JORDAN  
COMPUTER SIMULATION OF FIRED REACTORS AND HEATERS  
NATIONAL PETROLEUM REFINERS ASSOCIATION NPRA C.C. NOV. 1971 pp 1-3
- 26° LOWE ALLEN & WALL TERRY  
COMBUSTION KINETICS IN THE MODELING OF LARGE, PULVERIZED FUEL FURNACES:  
A NUMERICAL EXPERIMENT IN SENSITIVITY  
AIChE JOURNAL VOL 23 NO. 4 JUL. 1977 pp 440-447
- 27° MACFADYEN N. K. & PAGE M. W.  
VERIFICATION OF AN ACID/ALKALI FLAME MODELLING TECHNIQUE BY COMPARISON  
WITH MEASUREMENTS IN 1-6 MW FLAMES  
BRITISH GAS CORPORATION APR. 1980 MRS 371 pp 1-25
- 28° MANN I. J. GARDER & MORRIS C.  
REACTOR DYNAMICS AND STRATEGIES FOR MINIMISING SO<sub>2</sub> EMISSIONS DURING  
START-UP OF CONTACT SULPHURIC ACID PLANT  
CHEM. ENG. SCIEN. VOL 35 1980 pp 185-192
- 29° MASTERS J. WEBB, R. J. & DAVIES R. M.  
THE USE OF MODELLING TECHNIQUES IN THE DESIGN AND APPLICATION OF RECUPE  
RATIVE BURNERS  
JOURNAL OF THE INSTITUTE OF ENERGY DEC. 1979 pp 196-204
- 30° MC CABE & SMITH  
UNIT OPERATIONS IN CHEMICAL ENGINEERING  
MC GRAW HILL; 3<sup>a</sup> EDICION (1977)
- 31° MEHROTR A. K. ET AL  
HIGH-TEMPERATURE CHLORINATION OF COAL ASH IN A FLUIDIZED BED RECOVERY OF  
ALUMINUM, IND. ENG. CHEM. PROCESS DES. DEV. 1982, No. 21 pp 37-44

- 32° MEHROTA A. K. ET AL  
HIGH-TEMPERATURE CHLORINATION OF COAL ASH IN A FLUIDIZED BED 2 RECOVERY  
OF IRON, SILICON AND TITANIUM  
IND. ENG. CHEM. PROCESS DES. DEV. 1982 NO. 21 pp 44-50
- 33° PASPEK S. C. & VARMA A.  
AN EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF ETHYLENE OXIDATION ON  
SUPPORTED PLATINUM IN AN ADIABATIC FIXED-BED REACTOR  
CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE VOL 35, 1980 pp 33-40
- 34° PERRY & CHILTON  
HANDBOOK OF CHEMICAL ENGINEERING  
MC GRAW HILL; 5ª EDICION (1982)
- 35° RAJAN RENGAR & WEN C. Y.  
A COMPREHENSIVE MODEL FOR FLUIDIZED BED COAL COMBUSTORS  
AIChE JOURNAL VOL 26, NO.4 Jul. 1980
- 36° REIS T.  
ABOUT COKE AND WHERE THE SULFUR WENT  
CHEMTECH, JUN. 1977, pp 366-373
- 37° SMITH J. M.  
INGENIERIA DE LA CINETICA QUIMICA  
CECSA 2ª EDICION 1977 MEXICO
- 38° U.S. PATENT 3 595 542  
PREHEATER USING DOWNWARDLY FLOWING, DIRECTLY CONTACTING, FLUIDIZING  
VAPORS FROM CALCINING STAGE OF CALCEROUS MATERIAL  
N. D. ASHMAN JULY 27, 1971
- 39° U.S. PATENT 3 300 196  
METHOD AND APPARATUS FOR ROTARY KILN CONTROL WITH A CALCINING RATE METER  
BENDY WILFRIE JANUARY 24, 1967

- 40° U.S. PATENT 2 987 381  
APPARATUS FOR CONDUCTING SOLID-FLUID REACTIONS  
CARTER JOSEPH E. JUNE 6, 1961
- 41° U.S. PATENT 3 514 259  
CARBON BLACK REACTOR AND PROCESS  
I. CERESNA MAY 26, 1970
- 42° U.S. PATENT 3 403 976  
TANGENTIAL ENTRY PRECOMBUSTION-TYPE REACTOR WITH OFFSET TUNNEL  
I. CERESNA OCTOBER 1, 1968
- 43° U.S. PATENTE 3 024 094  
REGENERATIVE FURNACE AND PROCESS OF OPERATING  
CLARENCE J. COBERLY MARCH 6, 1962
- 44° U.S. PATENT 3 630 850  
CRACKING FURNACE WITH BURNERS ENGAGING MIRROR IMAGE COILED TUBES  
DORRESTEYA W. R. DECEMBER 28, 1971
- 45° U.S. PATENT 3 313 534  
METHOD AND FURNACE FOR HEAT TREATING MINERALS  
FRANS R. D. APRIL 11, 1967
- 46° U.S. PATENT 3 309 170  
METHOD OF CALCINING AND CLASSIFYING BORATE  
GRISWOLD W. T. MARCH 14, 1967
- 47° U.S. PATENT 3 262 758  
APPARATUS FOR REFORMING SYNTHESIS GAS  
JAMES G. R. ET AL JULY 26, 1966
- 48° U.S. PATENT 3 047 371  
DEVICE FOR CARRYING OUT CHEMICAL REACTIONS AT HIGH TEMPERATURES  
KRAUSE WALTER JULY 31, 1972

- 49° U.S. PATENT 3 669 628  
BURNER AND FEEDSTOCK INJECTION ASSEMBLY FOR CARBON BLACK REACTOR  
LATHAM JUNE 13, 1972
- 50° U.S. PATENT 3 105 744  
METHOD FOR PRODUCING CALCINED TITANIUM DIOXIDE PIGMENT MATERIAL  
LUETHGE J.A. OCTOBER 1, 1963
- 51° U.S. PATENT 3 847 564  
APPARATUS AND PROCESS FOR BURNING LIQUID HYDROCARBONS IN A SYNTHESIS  
GAS GENERATOR  
MARION P. CHARLES NOVEMBER 12, 1974
- 52° U.S. PATENT 4 080 422  
METHOD FOR PRODUCING INSOLUBLE CALCIUM SULFATE ANHYDRITE  
MC CLEAR JUNE 30, 1975
- 53° U.S. PATENT 3 236 745  
CALCINING COKE  
METRAILER W. J. FEBRUARY 22, 1966
- 54° U.S. PATENT 3 409 406  
APPARATUS FOR THE PRODUCTION OF CARBON BLACK  
MURRAY LAWRENCE K. NOVEMBER 5, 1968
- 55° U.S. PATENT 3 595 541  
METHOD AND APPARATUS FOR TREATING PARTICULATE SOLIDS IN A FLUIDIZED BED  
PABICH HAROLD L. JULY 27, 1971
- 56° U.S. PATENT 2 772 948  
CALCINATION OF BARIUM CARBONATE  
HENRY W. RAHN & CHARLES J. SINDLINGER JUNE 10, 1955

- 57° U.S. PATENT 3 083 091  
SHAFT FURNACE SINTERING METHOD  
SCHENCK H. ET AL MARCH 26, 1963
- 58° U.S. PATENT 3 329 417  
METHOD AND APPARATUS FOR CALCINING INORGANIC HYDRATES  
RUBLE A. THEODORE JULY 4, 1967
- 59° U.S. PATENT 3 759 922  
MIXING NOZZLES FOR CARBONIZING FINE GRAIN FUELS IN A FLUIDIZED BED  
SCHAMALFELD PAUL ET AL SEPTEMBER 4, 1973
- 60° U.S. PATENT 3 607 062  
PROCESS AND APPARATUS FOR THE FLUIDIZED CALCINING COKE  
SUDDUTH RICHARD D. SEPTEMBER 21, 1971
- 61° U.S. PATENT 2 859 101  
REACTION FURNACE FOR PRODUCING CARBON DISULPHIDE  
YOKOTA NOBUO NOVEMBER 4, 1958
- 62° U.S. PATENT 3 423 324  
APPARATUS AND METHOD FOR PRODUCING SILICA AND OTHER OXIDES  
W.V. BEST ET AL JANUARY 21, 1969
- 63° U.S. PATENT 3 057 688  
CARBON BLACK PROCESS AND APPARATUS  
WILLIAMS D. C. OCTOBER 9, 1962
- 64° U.S. PATENT 3 926 562  
VERTICAL TUBE COMBUSTION REACTOR  
WILLIAMS F. W. & SHEINSON R. S. DECEMBER 16, 1975

- 65° WERTHER J. & HEGNER B.  
DETERMINATION OF OPTIMUM CONDITIONS OF INDUSTRIAL FLUIDIZED-BED REACTORS  
INTERNATIONAL CHEMICAL ENGINEERING VOL 21 NO. 4 OCT. 1981 pp 585-594
- 66° VAN DE VUSSE J.G.  
CONSECUTIVE REACTIONS IN HETEROGENEOUS SYSTEMS III. THE EFFECT OF  
OPERATION AND OF REACTOR DESIGN  
CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE 1966 VOL 21 pp 1239-1252
- 67° VERMA ARUM  
USE MEDIUM-BTU  
CHEMTECH JUNE 1980 pp 382-389
- 68° WALLOUCH R. W. & FAIR E. V.  
KINETICS OF THE COKE SHRINKAGE PROCESS DURING CALCINATION  
CARBON VOL 18 NO. 2 (1980) pp 147-153
- 69° WERTHER JOACHIN  
MODELING AND SCALE-UP OF INDUSTRIAL FLUIDIZED BED REACTORS  
CHEM. ENG. SCIENCE VOL 35, 1980 pp 372-379
- 70° VAZQUEZ M. BLANCA I.  
ESTUDIO DEL ARREGLO DEL HORNO DE LA SECCION DE OXODESHIDROGENACION DE  
BUTENOS  
TESIS PROFESIONAL, E.N.E.P. ZARAGOZA, U.N.A.M. (1984)
- 71° WILLIAMS A.  
PRODUCTION OF HIGH TEMPERATURE FLAMES  
INTERNATIONAL METALS REVIEWS 1978 NO.1 REVIEW 227
- 72° ZDONK, S. B. & GREEN E. J.  
PARAMETERS IN FURNACE DESIGN  
THE OIL AND GAS JOURNAL MAY 26, 1969 pp 85-91