



T  
621.2  
CRI

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Mecánica**



**“DISEÑO TERMICO DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR  
CON APROVECHAMIENTO DE ENERGIA TERMICA DE  
LA COMBUSTION DE LOS DESECHOS SOLIDOS  
MUNICIPALES”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de**

**INGENIERO MECANICO**

**Presentado por:**

**Carlos Patricio Criollo Yunga**

**Guayaquil - Ecuador**

**1991**

## AGRADECIMIENTO

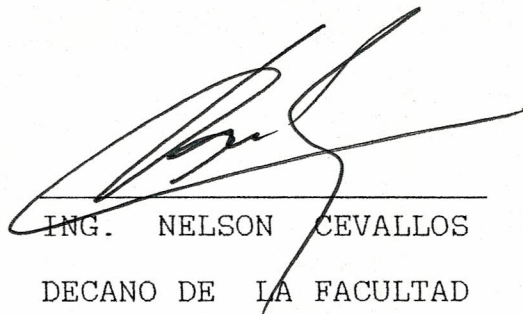
Al Ing. JORGE DUQUE, que bajo su acertada dirección se pudo desarrollar esta Tesis.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

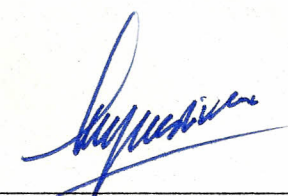
A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS




---

ING. NELSON CEVALLOS  
DECANO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERIA MECANICA



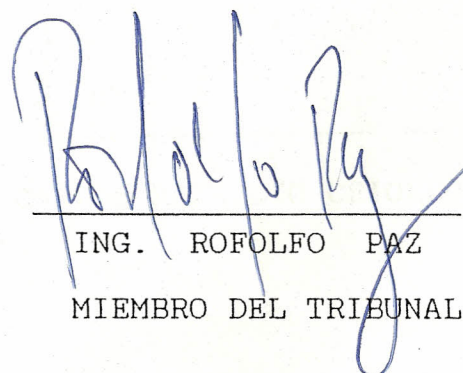
---

ING. JORGE DUQUE  
DIRECTOR DE TESIS



---

ING. MARIO PATIÑO  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



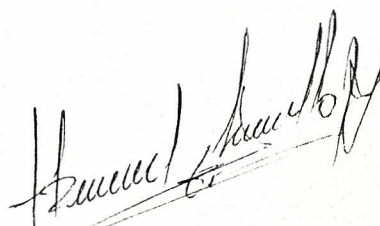
---

ING. ROFOLFO PAZ  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

## DECLARACION EXPRESA

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

( Regamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL ).



---

CARLOS PATRICIO CRIOLLO Y

## R E S U M E N

El presente trabajo está orientado al diseño de una caldera acuotubular de un sólo domo longitudinal de tubos rectos que usa desechos sólidos municipales como combustible.

La finalidad de éste proyecto es la de dar las características principales del método de eliminación de residuos, que comprende desde el análisis de desperdicios producidos, proceso de combustión y procedimiento de diseño de la caldera como un sistema de recuperación de calor.

Las características de la caldera son:

CAPACIDAD	:	2.000 Kg vapor/h
PRESION DE OPERACION	:	15 Kg/cm <sup>2</sup>
COMBUSTIBLE	:	Desechos sólidos municipales, 780 Kg/h
COMBUSTIBLE AUXILIAR	:	Oil No.2 (Diesel)

## INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	XI
INDICE DE TABLAS .....	XII
INDICE DE ABREVIATURAS .....	XIII

### CAPITULO I : INTRODUCCION

1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO .....	1
1.2 CARACTERISTICAS DEL PROCESO .....	3
1.3 CLASIFICACION GENERAL DE LOS DESECHOS .....	4
1.4 PROPIEDADES DE LOS DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES .....	6
1.5 COMPOSICION GENERAL DE LOS "DSM" ..	8

### CAPITULO II : SISTEMA DE INCINERACION DE LOS "DSM"

2.1 FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA COMBUSTION .....	13
2.1.1 PROCESO DE COMBUSTION .....	14
2.1.2 MANIPULACION DEL AIRE DE	

	COMBUSTION .....	19
2.2	CONSIDERACIONES DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTION Y EFICIENCIA .....	21
2.2.1	TEMPERATURA ADIABATICA DE LA FLAMA .....	22
2.2.2	EFICIENCIA DE COMBUSTION ..	24
2.3	SELECCION DE LA CALDERA A DISEÑARSE .....	25
2.4	PARTES PRINCIPALES DE LA CALDERA .	28
2.4.1	HOGAR DE LA CALDERA .....	28
2.4.2	PARRILLA .....	30
2.4.3	AREA DE QUEMADO .....	32
2.4.4	CENICERO .....	33
2.4.5	PUERTA DEL HOGAR .....	34
2.4.6	SUPERFICIE DE CALEFACCION .	34
2.4.7	DOMO SUPERIOR .....	36
2.4.8	CHIMENEA .....	36
2.5	QUEMADOR .....	39
2.5.1	VALOR CALORIFICO DEL DIESEL	40
2.6	ESPECIFICACIONES DE LA CALDERA ...	44

### CAPITULO III : PROCESO DE COMBUSTION

3.1	TIPO Y CANTIDAD DE BASURA A UTILIZARSE .....	46
3.2	VALOR CALORIFICO ALTO DE LA BASURA .....	47



3.3	COMBUSTION DE LA BASURA .....	48
3.4	REQUERIMIENTOS DE AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTION .....	49
3.5	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION .....	50
3.5.1	MASA DE LOS HUMOS DE LA COMBUSTION .....	50
3.5.2	COMPOSICION DE LOS HUMOS .	51
3.6	TEMPERATURA ADIABATICA DE LA LLAMA .....	51

#### CAPITULO IV : PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

4.1	ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO .....	53
4.2	DATOS PARA EL DISEÑO .....	54
4.3	CALOR DE VAPORIZACION .....	55
4.4	CANTIDAD DE DESECHO A UTILIZARSE .	56
4.5	FLUJO MASICO DE HUMOS .....	57
4.6	CALCULO DE LA SUPERFICIE DE LA PARRILLA .....	57
4.7	VOLUMEN DEL HOGAR .....	58
4.8	DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMARA ....	59
4.9	TEMPERATURA DE LOS GASES .....	60
4.10	CALCULO DE LOS TUBOS .....	67
4.11	CALOR TRANSMITIDO POR CONVECCION .	70
4.12	CALOR TRANSMITIDO POR RADIACION ..	73
4.13	DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DEL TUBO .....	82

4.14	CHIMENEA .....	86
4.14.1	AREA DE LA SECCION TRANS- VERSAL DE LA CHIMENEA .....	86
4.14.2	ALTURA DE LA CHIMENEA .....	87
4.15	SELECCION DEL QUEMADOR .....	88
4.16	DIMENSIONES DEL DOMO .....	89
4.17	SELECCION DE MATERIALES .....	91
4.18	ANALISIS DE LA CIRCULACION .....	96
CAPITULO V : LOCALIZACION DEL PROYECTO .....		106
CAPITULO VI : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		112
APENDICE.....		116
BIBLIOGRAFIA .....		121

## INDICE DE FIGURAS

No.	Descripción	Pág.
2.1	SECCION DE UNA CALDERA DE DOMO LONGITUDINAL CON TUBOS INCLINADOS .....	27
2.2	LINEAS DE FLUJO DE LOS GASES, VAPOR Y AGUA EN LA CALDERA .....	28
2.3	PARTES PRINCIPALES DE LA CALDERA .....	29
2.5	EQUIPO INTERNO DE LOS DOMOS .....	31
2.6	DIAGRAMA DE SANKEY .....	37
2.7	CALOR DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION - FUEL OIL LIGERO .....	42
4.1	ENERGIA SENSIBLE DE LOS GASES DE COMBUSTION ...	43
4.2	PORCENTAJE DE SBV MAXIMO RECOMENDADO .....	67
4.3	EMISIVIDAD DEL DIOXIDO DE CARBONO .....	68
4.4	EMISIVIDAD DEL VAPOR DE AGUA .....	75
4.5	FACTOR DE CORRECCION PARA EMISIVIDAD DEL VAPOR DE AGUA .....	76
4.6	COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA VARIOS LIQUIDOS .....	83
4.7	FACTORES DE CORRECCION DE DIAMETRO Y TEMPERATURA .....	84
4.8	RUGOSIDAD RELATIVA DE LOS TUBOS .....	98
4.9	DIAGRAMA DE MOODY .....	99

## INDICE DE TABLAS

No.	Descripción	Pág.
I	CLASIFICACION GENERAL DE LOS DESECHOS .....	5
II	PESO ESPECIFICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DESECHOS .....	7
III	COMPOSICION DE LA BASURA PRODUCIDA EN GUAYAQUIL .....	9
IV	ANALISIS PROXIMO Y ULTIMO DE LOS DESECHOS SOLIDOS TIPO 2 .....	11
V	PRODUCTOS DE LA COMBUSTION .....	52
VI	LONGITUDES DE HACES RADIANTES .....	79
VII	TEMPERATURA MAXIMA DEL METAL .....	92
VIII	RESULTADOS FINALES DEL DISEÑO .....	93

## INDICE DE ABREVIATURAS

Acp	:	Area proyectada efectiva en el hogar, m <sup>2</sup>
Af	:	Area de flujo, m <sup>2</sup>
Ao	:	Area de calefacción, m <sup>2</sup>
Afv	:	Area de flujo de la mezcla, m <sup>2</sup>
Afd	:	Area de flujo, circuito descendente, m <sup>2</sup>
Ap	:	Area de parrilla, m <sup>2</sup>
Ar	:	Aire real de combustión, Kg aire/Kg basura
ARR	:	Area re-radiante del hogar, m <sup>2</sup>
ar	:	Emisividad efectiva de la flama
B	:	Presión barométrica, mm Hg
C	:	Contenido de carbón en el combustible, Kg/Kg
Cc	:	Coefficiente de combustión, Kg/h.m <sup>2</sup>
Cpm	:	Calor específico medio de los gases, Kcal/Kg.°C
D	:	Diámetro de la chimenea, m
Dd	:	Diámetro del domo, m
DSM	:	Desechos sólidos municipales
EA	:	Cantidad de exceso de aire, %
Fh	:	Factor de corrección para Nusselt
Fa	:	Factor de corrección del diámetro
Ft	:	Factor de corrección de temperatura
G1	:	Flujo de mezcla en los tubos, Kg/h
G2	:	Flujo de humos sobre los tubos, Kg/m <sup>2</sup> .seg
G	:	Flujo en el circuito ascendente, Kg/h.m <sup>2</sup>
Gd	:	Flujo en el circuito descendente, Kg/h.m <sup>2</sup>
H	:	Altura de la chimenea, m
HHV	:	Valor calorífico alto de la basura, Kcal/Kg
H2	:	Contenido de hidrógeno en la basura, Kg/Kg
h1	:	Entalpía del agua de alimentación, Kcal/Kg
h2	:	Entalpía del vapor a 215 psia, Kcal/Kg
hfg	:	Calor latente del vapor de agua, Kcal/Kg
h <sub>sr</sub>	:	Pérdidas en el circuito ascendente, ft H <sub>2</sub> O
h <sub>sd</sub>	:	Pérdidas en el circuito descendente, ft H <sub>2</sub> O
Kg	:	Conductividad térmica de los gases. Kcal/h.m.°C
L	:	Longitud del haz radiante, m
Lf	:	Longitud de la sección de flujo, m
Lr	:	Longitud de los tubos ascendentes, m
La	:	Longitud de los tubos descendentes, m
M	:	Contenido de humedad de la basura, Kg/Kg
nc	:	Eficiencia de combustión, %
η	:	Eficiencia de la caldera, %
Np	:	Número de hileras de tubos de profundidad
N	:	Número total de tubos

N <sub>2</sub>	:	Contenido de nitrógeno en la basura, Kg/Kg
O <sub>2</sub>	:	Contenido de oxígeno en la basura, Kg/Kg
P <sub>c</sub>	:	Presión parcial de dióxido de carbón, atm
P <sub>w</sub>	:	Presión parcial del vapor de agua, atm
P <sub>e</sub>	:	Pérdidas de tiro en la chimenea, plg. H <sub>2</sub> O
p <sub>1</sub>	:	Pérdidas a través de la parrilla, plg. H <sub>2</sub> O
p <sub>2</sub>	:	Pérdidas a través de la cámara de combustión, plg. H <sub>2</sub> O
Q <sub>c</sub>	:	Calor transmitido por convección, Kcal/h
Q <sub>r</sub>	:	Calor transmitido por radiación, Kcal/h
S	:	Contenido de azufre en la basura, Kg/Kg
St	:	Distancia centro a centro de los tubos transversales al flujo de gases, m
Sl	:	Distancia centro a centro de los tubos paralelos al flujo de gases, m
S <sub>1</sub>	:	Area transversal de los tubos, m <sup>2</sup>
S <sub>2</sub>	:	Area de la sección transversal de la chimenea, m <sup>2</sup>
SBV	:	Porcentaje de vapor por volumen, %
SBW	:	Porcentaje de vapor por peso, %
T <sub>e</sub>	:	Temperatura de los gases. °C
T <sub>ad</sub>	:	Temperatura adiabática de la llama, °C
t <sub>ah</sub>	:	Temperatura del precalentador de aire, °C
t <sub>a</sub>	:	Temperatura del aire como entra, °C
T <sub>s</sub>	:	Temperatura del tubo, °C
T <sub>g</sub>	:	Temperatura media de los gases, °C
μ	:	Concentración de la ceniza, gm/Nm <sup>3</sup>
μ <sub>g</sub>	:	Viscosidad de los gases, Kg/h/m
μ	:	Viscosidad absoluta del agua saturada, Kg/h/m
U <sub>o</sub>	:	Coefficiente total de transferencia de calor, Kcal/h/m <sup>2</sup> /°C
V <sub>b</sub>	:	Volumen de la basura, m <sup>3</sup>
V <sub>h</sub>	:	Volumen del hogar, m <sup>3</sup>
V <sub>1</sub>	:	Velocidad del agua en los tubos, m/s
V <sub>2</sub>	:	Velocidad de los gases en la chimenea, m/s
V <sub>D</sub>	:	Capacidad de domo, m <sup>3</sup>
V <sub>v</sub>	:	Volumen del vapor, m <sup>3</sup>
W	:	Producción de la caldera, Kg vapor/h
W <sub>a</sub>	:	Aire teórico para la combustión, Kg aire/Kg bas
W <sub>f</sub>	:	Cantidad de basura a quemar, Kg/h
W <sub>h</sub>	:	Masa de los humos, Kg/h
W <sub>v</sub>	:	Flujo total en el sistema, Kg mezcla/h
Z	:	Contenido de sólidos incombustibles en la basura Kg/Kg
Z <sub>c</sub>	:	Diferencia de altura en el sistema de circulación, m
δ	:	Peso específico de la basura, kg/m <sup>3</sup>
δ <sub>a</sub>	:	Densidad del agua, Kg/m <sup>3</sup>
δ <sub>d</sub>	:	Densidad del diesel, Kg/lt
δ <sub>g</sub>	:	Densidad de los gases, Kg/m <sup>3</sup>
δ <sub>c</sub>	:	Peso específico de los humos a 420°F, Kg/m <sup>3</sup>
δ <sub>o</sub>	:	Peso específico del aire a 60°F, Kg/m <sup>3</sup>
γ <sub>f</sub>	:	Peso específico del agua saturada, Kg/m <sup>3</sup>

- $\gamma_g$  : Peso específico del vapor saturado, Kg/m<sup>3</sup>
- $\gamma_{mez}$  : Peso específico de la mezcla, Kg/m<sup>3</sup>
- $S$  : Factor de suciedad
- $\psi$  : Relacion de área radiante a area total

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### 1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Uno de los problemas que afronta la comunidad actual es la producción de desechos que cada vez es mayor, debido a factores tales como el aumento de la población o el desarrollo de la industria.

En nuestro medio la gran generación de basura a representado siempre una fuente de contaminación y polución, sobre todo por la falta de un método adecuado para su tratamiento y eliminación, convirtiéndose en un foco de enfermedades y epidémias que afectan el bienestar del medio ambiente.

Uno de los mecanismos utilizados para eliminar los residuos industriales, residenciales, de establecimientos de comercio y de servicio, etc. es el proceso de incineración de desechos, donde los gases de combustión presentan una oportunidad de aprovechamiento de energía térmica.



La energía aprovechada está en función de la cantidad y composición de los desechos generados en un establecimiento o localidad. Según estudios realizados la producción de basura en los cantones de la provincia del Guayas es de un promedio de 0,9 Kg/habitante/día. (1). Considerando una media poblacional de 10.000 habitantes, se tiene 9 toneladas de desechos sólidos municipales producidos diariamente, con lo que se justificaría la instalación de calderas cuyo vapor puede ser utilizado para calefacción en hospitales de la sierra, calentamiento de agua doméstica utilizable en baños de centros deportivos y similares o también en la producción de energía eléctrica para minas aisladas o pueblos pequeños alejados de redes más importantes, donde el transporte constituye un problema fundamental y no exista posibilidad de generación hidroeléctrica.

Es por eso, que el diseño de un sistema de recuperación de calor, como una caldera que tenga como combustible los desechos sólidos municipales que se generan en nuestro medio, tiene gran importancia tanto por la alternativa que da a la solución de la contaminación ambiental causada por la basura como por las diferentes utilidades que brinda el vapor producido.

## 1.2 CARACTERISTICAS DEL PROCESO

La característica principal de una instalación de incineración, es la de reducir a cenizas grandes volúmenes de basura combustible, quemándolos a temperaturas que oscilan entre los 600 a 900°C. (2).

Un incinerador es fundamentalmente un horno refractario para altas temperaturas, provisto de un quemador para iniciar la combustión de los residuos, un hogar en el cual se efectúa la combustión, una parrilla de carga de los desperdicios y que permite el paso de aire, un receptor de cenizas en la parte inferior, y la chimenea que produce el tiro necesario para dispersar los gases de la combustión a la atmósfera.

Sobre el lado de la caldera, los límites de suministro de calor desde la incineración del rechazo están establecidos por el supercalentamiento máximo permisible y la temperatura del gas de desecho sobre los cuales la ingeniería y la selección de materiales están basados. La superficie total de calefacción debe exceder los requerimientos normales calculados en el diseño por cerca del 30% para permitir el efecto de ensuciamiento de las cenizas volantes del rechazo, y deben ser construidas de manera que sean accesibles

para inspección y limpieza. (3).

### 1.3 CLASIFICACION GENERAL DE LOS DESECHOS

El conocimiento de la cantidad y características de los residuos de una localidad, es fundamental para diseñar y operar satisfactoriamente las instalaciones de tratamiento y eliminación de desechos.

Las diferentes clases de residuos provenientes de las distintas actividades, determinan la utilización de varios tipos de incineradores. La base para la satisfactoria operación de los diferentes tipos de incineradores es el apropiado análisis del desecho a ser destruido, y la selección del equipo que destruya en mejor forma ese tipo de desecho en particular.

El resumen de la tabla 1.1 presenta una clasificación de los diferentes tipos de desechos indicando sus componentes, así como también los porcentajes de humedad y de sólidos incombustibles existentes, además la energía por Kg de desecho que generan en el proceso de incineración. La tabla se presenta por su utilidad en el dimensionamiento de la cámara de combustión y en la selección de los quemadores.

TABLA I (2)

TIPO	PRINCIPALES COMPONENTES Y FUENTES	COMPOSICION APROXIMADA (% PESO)	CONTENIDO POR PESO EN % Ceniza Humedad	SOLIDOS INCOMBUSTIBLES %	PODER CALORIFICO Kcal/Kg (BTU/lb)	COMBUSTIBLE AUX. A INCLUIRSE EN LOS CALCULOS DE COMBUSTION : Kcal/Kg (BTU/lb)	QUEMADOR AUX. Kcal/hr/Kg (BTU/hr/lb) DE BASURA
1	Basura combustible, papeles, cartones, pedales y similares	Constituido por: 80 % del desperdicio de madera y 20% del desperdicio proveniente de fuentes residenciales y comerciales	10 25	10	3603,6 (6.500)	0	0
2	Desperdicios de fuentes residenciales	Constituido por: 50 % del desperdicio de fuentes residenciales y 3. % de desperdicio proveniente de fuentes residenciales	7 50	7	2383,9 (4.300)	0	942,5 (1.700)
3	Desperdicios de fuentes comerciales	Constituido por: 35 % del desperdicio de fuentes comerciales como: Restaurantes, hoteles, mercados, comedores, instituciones y similares	5 70	5	1386 (2.500)	831,6 (1.500)	1663,2 (3.000)
4	Basura inorgánica y residuos de animales y humanos	Constituido por: Tejidos, animales y humanos 100% provenientes de hospitales, laboratorios, mataderos de animales, etc y similares	5 85	5	554,4 (1.000)	997,9 (1.800)	4435 (8.000) 2772 (5.000) Prim. (3.000) Secun. 1663,2

#### 1.4 PROPIEDADES DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Los componentes de los desechos sólidos municipales incluye casi todos los descargados por establecimientos residenciales, comerciales e industriales dentro de cualquier comunidad. La composición de los desechos es una reflexión de la sociedad: su nivel de ingresos, sus necesidades por conveniencia, sus registros de limpieza y saneamiento, y su avance tecnológico. La composición de los DSM refleja la producción de alimentos, distribución y hábitos de consumo de una sociedad. Esta composición también incluye la presencia de sustancias tóxicas y/o peligrosas en una casa. Finalmente, éstos desechos de sociedad deben ser ya sea quemados o enterrados. Consecuentemente, sus características de combustión son de interés.

Además los desperdicios se caracterizan por las siguientes propiedades:

##### a). Peso específico

Esta propiedad tiene influencia en la capacidad de los medios de recolección y almacenamiento de los desperdicios.

A continuación se dan algunos valores de peso por unidad de volumen para varios tipos de desechos.

**T A B L A   I I**  
**PESO ESPECIFICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DESECHOS**

TIPO	PESO ESPECIFICO (8) (kg/m <sup>3</sup> )
1	144,50
2	280,90
3	521,60
4	802,50
Desperdicios con 70% de agua	682,10
Pedazos de madera y aserrín	208,60

Fuente: Referencia (2)

Sin embargo, cabe anotar que estos valores varían por ser la basura un producto tan heterogéneo. Por falta de información para la basura de nuestro medio se la considerará, por su composición y origen, como basura TIPO 2 para propósito de cálculo.

**b). Grado de humedad**

El contenido de agua en la basura, influye notablemente en su poder calorífico útil; la humedad no sólo depende de la naturaleza de la basura sino también del clima, siendo más sensible en épocas de lluvia.

### c). Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía que es liberada por la completa combustión de una cantidad unitaria del combustible.

Si todo el vapor formado por la combustión se condensa cuando los productos vuelven a la temperatura inicial de ensayo, la cantidad de calor cedido o rechazado es el Poder calorífico superior. El calor latente de vapor de agua en el PCS en muchos procesos no forma parte de la energía aprovechable, por lo que, se ha determinado el llamado Poder calorífico inferior; que es la diferencia entre el poder calorífico superior y el calor latente del vapor de agua condensado en la combustión.

## 1.5 COMPOSICION GENERAL DE LOS DSM

La combustión es un proceso químico que cambia la composición química de los DSM. Debido a éste proceso, la composición química de los DSM debe ser claramente entendida.

### a). Elementos componentes de los DSM

El rechazo municipal está compuesto de muchos metales y plásticos, desechos de alimentos, madera, textiles, caucho, cuero y un sinnúmero de materiales

inorgánicos. Aunque el porcentaje de cada material varía un poco por localización y como una función del tiempo, una composición típica de los DSM en la ciudad de Guayaquil puede ser estimada como muestra la tabla III.

**TABLA III**  
**COMPOSICION DE LA BASURA EN GUAYAQUIL**

COMPONENTES	% EN PESO
Materiales orgánicos	61,2
Papel y cartón	18,3
Gomas, caucho y plásticos	5,6
Metales	2,4
Textiles y trapos	2,0
Vidrios	1,1
Maderas, piedras, cenizas, tierra y otros	9,4
Valor calorífico alto, (Kcal/Kg)	2106

**Fuente:** Referencia (4)

Sin embargo, hacer generalizaciones acerca de la composición de los DSM es difícil. La composición puede variar significativamente de una comunidad a otra y dentro de cualquier comunidad dependiendo del tiempo. Las variaciones en la composición que resulta de las diferentes comunidades son una función de



las condiciones económicas, nivel de educación, tipo de industria, dedicación a programas tales como recolección y otras variables similares.

**b). Composición química de los DSM**

La combustión es un proceso químico donde el carbón, azufre, hidrógeno y el nitrógeno encontrados en desechos son oxigenados a dióxido de carbón, agua, dióxido de azufre y varios óxidos de nitrógeno, es por eso, que los estudios de la composición química tienen valor en la investigación de los potenciales de contaminación del aire por los gases de escape. Datos de análisis elemental de los desperdicios se pueden observar en la Tabla A del apéndice.

Los desechos combustibles son altamente diferentes como ya se ha indicado. La amplia variedad de papeles incluye los productos vasados en pulpa mecánica y termomecánica tales como papel para periódico y productos basados en pulpa química, tales como papel blanco y cartulina. Desde una perspectiva simple, la pulpa mecánica contiene los mismos constituyentes de la madera, mientras la pulpa química contiene celulosa con cantidades variables de hemicelulosa.

Los plásticos encontrados en los desechos ordinarios incluye nylon, polietileno, poliestireno, espu

mas de poliuretano, resinas de fibra de vidrio, poli-  
vinil y un sinnúmero de polímeros hechos por el hom-  
bre. Los productos de caucho que contienen los dese-  
chos ordinarios son referidos a los plásticos. Final-  
mente, la madera y desechos de madera, celulósicos y  
desechos de alimentos grasosos, desechos de corral y  
productos relativos son parte de los desechos ordina-  
rios. Estos componentes tienen variables estructuras  
químicas.

TABLA IV

ANÁLISIS TÍPICO. PRÓXIMO Y ÚLTIMO DE LOS DSM. TIPO 2

Parámetro analítico	Valor ( % )
Análisis próximo:	
Humedad	25,2
Cenizas	24,4
Carbón fijo	50,4
Materia volátil	
Análisis último:	
Carbón	25,6
Hidrógeno	3,4
Oxígeno	20,3
Nitrógeno	0,5
Cloro	0,45
Azufre	0,15
Humedad	25,2
Cenizas (Inertes)	24,4
Valor calorífico alto:	
Kcal/Kg	2472
BTU/lb	4450

Fuente: Referencia (5)

**c). Análisis elemental de los DSM**

El análisis último de los varios componentes de los DSM refuerza el concepto de que los desechos sólidos municipales están compuestos de muchos materiales heterogéneos como lo muestra la Tabla A del apéndice. Cuando una composición próxima (porcentaje de humedad, carbón fijo, materia volátil y contenido de cenizas) y análisis último se realiza para un desecho municipal típico, los resultados son consistentemente similares. La Tabla IV muestra el análisis próximo y último de un DSM, que por falta de información referente a la basura de nuestro medio, se considerará ésta tabla para propósitos de cálculo de la combustión.

## CAPITULO II

### SISTEMA DE INCINERACION DE LOS DSM

#### 2.1 FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA COMBUSTION

El dato de la composición presentado en el capítulo anterior provee una base para el entendimiento del proceso de la combustión de los DSM.

El quemado de la masa de una mezcla de DSM es la tecnología dominante usada para destruir térmicamente los rechazos de una comunidad.

El componente básico asociado con ésta tecnología es

1.- Sistema de incineración que comprende:

- a) áreas de recolección y sistema de alimentación del desecho.
- b) Sistema de combustión
- c) Sistema de control de la calidad del aire

Un segundo sistema, distinto del anterior, puede ser acoplado, que es:

2.- Sistema de recuperación y utilización del calor que comprende:

- a) Sistema cerrado de agua, tratamiento del agua de alimentación y calentamiento.
- b) Sistema de caldera (incluyendo economizador, caldera y supercalentador)
- c) Turbina-generador y el condensador
- d) Sistema de liberación del calor rechazado.

De éstos sistemas, el proceso de combustión de los desechos y la selección de la caldera serán los puntos sobre los cuales se enfocará éste capítulo.

### 2.1.1 PROCESO DE COMBUSTION

La manipulación de los DSM es un sistema complejo de reacción química el cual involucra un número de materiales combustibles. Los procesos asociados con la combustión de los desechos sólidos incluye la manipulación de la secuencia de mecanismos para la combustión completa y la minimización en volumen de los desechos, máxima generación y recuperación de energía en un costo efectivo y control de la combustión para minimizar las emisiones.

Los métodos para la manipulación del proceso

de combustión están dados con el combustible mismo. El combustible puede ser o no preparado para remover algunos contaminantes, reducir la carga inerte sobre la parrilla y promover una mayor uniformidad en el combustible.

La manipulación de los mecanismos de combustión involucra luego al diseño y operación del sistema de combustión la utilización de las 3 " Ts " de combustión: tiempo, temperatura y turbulencia o mezcla. Es esencial, asegurar adecuado oxígeno a todas las porciones del sistema de combustión y una adecuada mezcla. La manipulación de la temperatura y tiempo de residencia para el control de CO, hidrocarburos y bióxidos sin promover la formación de óxidos de nitrógeno es un segundo fin. La manipulación de la temperatura de la flama y la temperatura final a la chimenea para máxima eficiencia es también esencial.

Esta secuencia de reacciones incluye mecanismos específicos importantes que son:

a) Secado y calentamiento a la temperatura de reacción.

Toda la combustión de los materiales sólidos

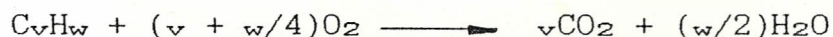
empieza por el proceso físico de calentamiento de la masa combustible o desecho. Este calentamiento saca cualquier contenido de humedad en el material. Además éste aumenta la temperatura del desecho a un nivel donde comienza el proceso químico asociado con la oxidación térmica. La variable crítica asociada con esta fase del mecanismo total es la temperatura de reacción para los sólidos. Para la pulpa química basada en papeles, tales temperaturas de reacción están cerca de  $300^{\circ}\text{C}$  ( $570^{\circ}\text{F}$ ). Para desechos de madera la temperatura puede estar alrededor de  $250^{\circ}\text{C}$  ( $480^{\circ}\text{F}$ ). Para desechos de frutas la temperatura puede ser de  $200 - 230^{\circ}\text{C}$  ( $400 - 450^{\circ}\text{F}$ ). (5).

El calentamiento y secado son procesos endotérmicos. Consecuentemente el consumo de energía y razones de reacción son variables adicionales importantes asociadas con esta fase del proceso de combustión. El consumo de energía es una función del contenido de humedad, capacidad calorífica, y conductividad térmica de la masa de los materiales heterogéneos alimentados a la cámara de combustión. Las razones de calentamiento son una función del tamaño de

partícula, particularmente de la menor dimensión como del ancho efectivo del material sobre la parrilla. Las razones de calentamiento también están en función de la conductividad térmica de la partícula, la temperatura en el hogar y los mecanismos de transferencia de calor radiante. Finalmente, las razones de calentamiento de los combustibles en los desechos sólidos municipales son una función de la magnitud y naturaleza de los materiales incombustibles alimentados al incinerador.

#### b) Reacciones de combustión

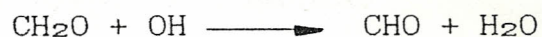
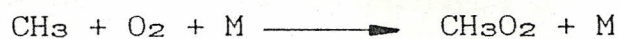
El desecho sólido municipal es una sustancia carbonosa conteniendo cantidades significativas de hidrógeno, azufre y cloro. La ecuación resumida para la combustión estequiométrica de hidrocarburos, asumiendo oxígeno como el oxidante, es como sigue:



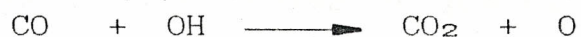
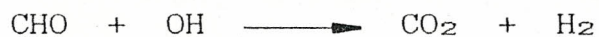
En esta ecuación las letras pequeñas representan las cantidades de los elementos químicos: carbono, hidrógeno y oxígeno. Es difícil predecir la lista de las probables y posibles reacciones. Una de las muchas posibles secuencias



es como sigue:



M denota cualquier especie de calor removido. La importancia de la secuencia de reacciones mostrada es solamente que indica la generación y uso de radicales hidróxilos que son las especies más reactivas en el sistema de combustión. Las reacciones de combustión de la fase primaria son seguidas por la post - flama o reacciones de combustión secundaria, incluyendo la siguiente secuencia representativa:



Las reacciones de la post - combustión son responsables para completar los procesos de oxidación del desecho sólido. Estas reacciones incluye las secuencias requeridas para la oxidación del monóxido de carbono, donde las reacciones son lentas. Además, estas reacciones re

duce presencia de hidrocarburos no - metanos y otros productos de combustión incompleta de los gases a la chimenea.

### 2.1.2 MANIPULACION DEL AIRE DE COMBUSTION

La manipulación del aire de combustión es el parámetro que domina la combustión.

#### a) Exceso de aire

El exceso de aire tiene una significativa influencia sobre la temperatura de la flama, eficiencia térmica y emisiones de CO y bióxidos. Los niveles de exceso de aire de 40 a 153 % (6 a 12 % O<sub>2</sub> en los gases a la chimenea) son generalmente usados para la combustión de los DSM. Datos operacionales de plantas bien diseñadas y operadas efectivamente confirman éste amplio rango de exceso de aire y dan un desgmen to más estrecho, sobre el cual se enfocan los niveles de exceso de aire, que está en la mitad de éste rango. Los porcentajes típicos de exceso de aire están en el rango de 70 a 110 %.

(5).

#### b) Distribución del aire de combustión

El control total de la cantidad de aire usado

es el proceso de la combustión es una de las dos mayores variables referidas al aire. El segundo principio de significancia es la distribución de ese aire, que comprende dos cuestiones:

- 1.- Distribución del aire asociado con el sistema de parrilla; y,
- 2.- Distribución del aire en el hogar como un todo, con énfasis en las relaciones de aire bajo-fuego/sobre-fuego.

La distribución del aire debajo de la parrilla requiere suficientes plenums ajustables para asegurar un adecuado aire a todas las porciones de la parrilla. Muchas parrillas tienen por lo menos cuatro plenums separados y operados independientemente.

La distribución del aire adicional surge de la medida de utilización del aire sobre el fuego. Típicamente en instalaciones de quemado de masas, el aire es introducido tanto como aire primario (bajo la parrilla) y como aire secundario (sobre el fuego). Tal distribución del aire influencia la formación de emisiones orgánicas y el control de óxidos de nitrógeno a

través del escenario de combustión.

La distribución del aire de combustión puede ser expresada ya sea como porcentaje del aire total existente usado como aire sobre el fuego o puede ser expresada en términos de razón de parrilla estequiométrica, (RPE).

Esta razón es calculada como sigue:

$$\text{RPE} = (\text{Kg O}_2, \text{aire primario} + \text{Kg O}_2, \text{combustible}) / \text{Kg O}_2 \text{ requerido para completar la oxidación del carbón, hidrógeno y azufre contenidos en el combustible.}$$

Combustión apropiada ocurre cuando  $\text{RPE} < 1,0$ . Es importante diseñar las toberas de aire para máxima penetración y turbulencia. Similarmente una apropiada colocación de las toberas de aire secundario es necesario para optimizar el proceso de combustión.

## 2.2 CONSIDERACIONES DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTION Y EFICIENCIA

El término oxidación es una reacción a alta temperatura generando calor el cual puede ser empleado en

un propósito útil (generación de vapor, usado para la producción de electricidad). La temperatura y el calor liberado son parámetros fundamentales para lograr máxima eficiencia del sistema y un control de costos. Esta sección está enfocada en la temperatura de la flama y la eficiencia térmica del sistema de combustión.

### 2.2.1 TEMPERATURA ADIABATICA DE LA FLAMA

La temperatura de la flama es un parámetro crítico esencial en la manipulación del proceso de combustión. Esta puede ser calculada por la solución iterativa de la siguiente ecuación:

$$\sum H_p = \sum n_i \int_{298}^T C_{pi} dT + \sum n_i \lambda_i$$

Donde  $H_p$  es la entalpía de los productos (Kcal/Kg - mol),  $T$  es la temperatura de la flama ( $^{\circ}$ K),  $C_{pi}$  es el calor específico,  $n$  es los gr - mol, y  $\lambda$  es el calor latente asociado con los cambios de fase (calor de vaporización).

El uso de éste modelo matemático a demostrado que las curvas de la temperatura de la flama son parabólicas con respecto a la razón de equivalencia o exceso de oxígeno. La razón de equivalencia es calculada sobre una base molar

como sigue:

$$\text{Equivalencia } (\Phi) = \frac{(\text{combustible/aire, actual})}{(\text{combustible/aire, estequiometrico})}.$$

O en función del exceso de aire:

$$\Phi = 0,7242 - 0,0022 (\%EA)$$

La razón de equivalencia es usada para expresar la cantidad de aire usado. Dentro de la región donde la razón de equivalencia es 0,4 a 0,9 (exceso de aire de 150 a 11 %), las curvas de la temperatura adiabática de la flama son esencialmente lineales. Consecuentemente, las ecuaciones de regresión lineal pueden ser usadas para aproximar la temperatura adiabática de la flama.

Ecuaciones de regresión para la temperatura adiabática e la flama tienen que ser desarrolladas para la combustión de los DSM. La ecuación usando unidades inglesas es mostrada a continuación:

$$T_f = 0,108(HHV) + 3476(\Phi) - 4,544(M) + 0,59(T_a - 77) - 287$$

Donde  $T_f$  es la temperatura adiabática de la flama en °F, HHV es el valor calorífico alto del combustible (BTU/lb),  $M$  es el porcentaje de humedad del combustible, y  $T_a$  es la temperatura del aire como éste entra al hogar (después del precalentador de aire en caso de existir).

### 2.2.2 EFICIENCIA DE COMBUSTION

La eficiencia térmica puede ser calculada como sigue:

$$\eta_c = 1 - (HL/HI) \times 100$$

Donde  $\eta_c$  es la eficiencia (porcentaje), HL es la suma de todas las pérdidas de calor y HI es la suma de todos los calores de entrada. HL designa pérdidas de calor tales como pérdidas de gases secos a la chimenea, pérdidas por humedad, carbón no quemado, pérdidas por sólidos inertes y por radiación.

La eficiencia también puede ser vista en términos de energía. La energía es definida matemáticamente como:

$$\text{Energía} = H \left[ 1 - (T_o(\ln T_1/T_2)/(T_1 - T_2)) \right]$$

Donde  $E$  es energía o la aprovechabilidad de energía desde un origen dado para realizar un trabajo útil;  $H$  es la entalpía inicial del origen (esto es DSM) evaluado entre  $T_1$  y  $T_2$ ;  $T_1$  es la temperatura de la flama;  $T_2$  es la temperatura final (chimenea); y  $T_0$  es la temperatura ambiente.

El impacto del exceso de aire sobre la eficiencia es igualmente significativa. Una ecuación para la aproximación de la eficiencia es como sigue:

$$\eta_c = 76,87, - 0,057 (\%EA)$$

### 2.3 SELECCION DE LA CALDERA A DISEÑARSE

La selección de la caldera puede hacerse entre las calderas cilíndricas de tubos de humo y las acuotubulares, pero como el procedimiento de diseño de una caldera es uno de los objetivos de éste proyecto, se puede elegir como ejemplo una caldera acuotubular para el efecto; y, por las siguientes razones:

- 1.- En una caldera acuotubular se puede obtener vapor a mayor presión y temperatura.
- 2.- En una caldera acuotubular desaparecen los enormes colectores cilíndricos de agua, los que son

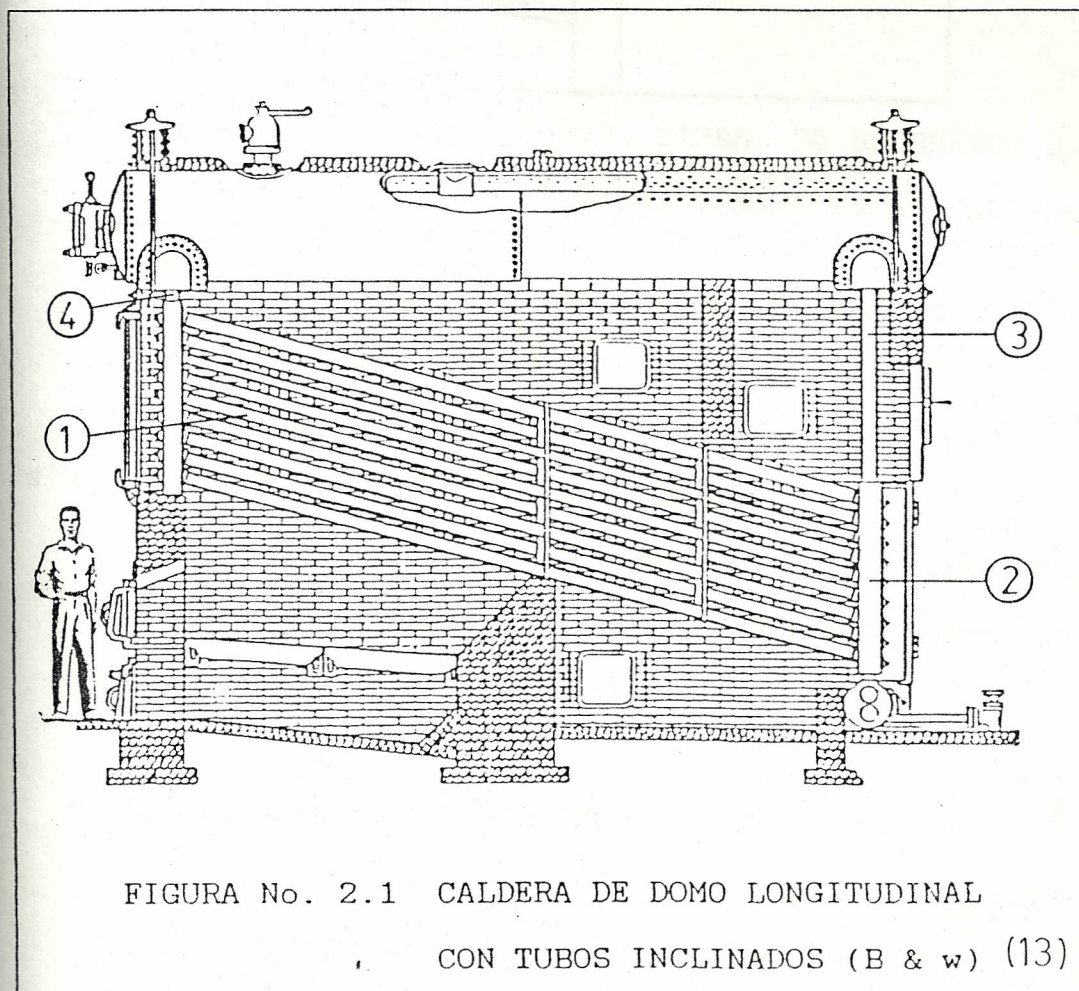


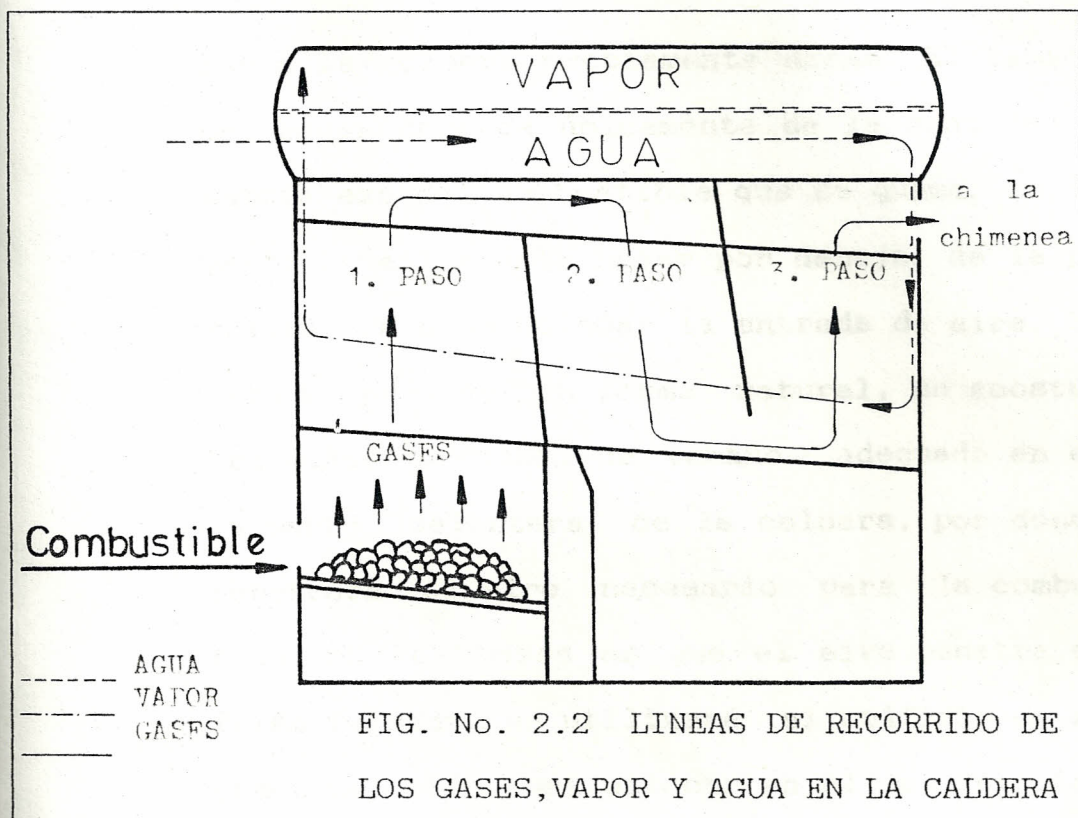
- sustituidos por un haz tubular constituido por una gran cantidad de tubos de pequeño diámetro.
- 3.- Las calderas cilíndricas de tubos de humo son de puesta en marcha lenta, necesitándose en algunos casos de 3 ó 4 horas de funcionamiento previo para poder llegar al estado de régimen, la que las hace no aptas para casos de emergencia.
  - 4.- En una caldera acuotubular, el polvo u hollín se recupera y almacena en tolvas.
  - 5.- El tamaño de los tubos y su espaciamiento, puede ser variado de tal manera, que la incrustación y abrasión sean reducidas al mínimo.
  - 6.- Los daños a consecuencia de grandes fluctuaciones de la temperatura de los gases, no ocurren fácilmente.
  - 7.- Un fogón con paredes enfriadas por agua, es fácilmente adaptable.

El proyecto presente, trata del diseño de una caldera acuotubular de un sólo domo longitudinal, de tubos inclinados que tiene hogar exterior que es donde se quemará la basura. Una representación de éste tipo de caldera es la que se muestra en la Fig. 2.1 sin recalentador de vapor.

El haz tubular (1), está constituido por una serie de

tubos dispuestos de una forma alternada, unidos anterior y posteriormente a dos cajas (2), suspendidas del cuerpo de la caldera, disposición que permite la libre dilatación del conjunto caja - haz tubular. El agua fría que va a vaporizarse, llega a la caja posterior a través del conjunto descendente (3), que une el colector con dicha caja. El vapor formado en el haz tubular asciende desde la caja anterior a la cámara de vapor a través del conducto (4).





La Fig. 2.2 indica el recorrido del combustible, del gas y del vapor, en la caldera.

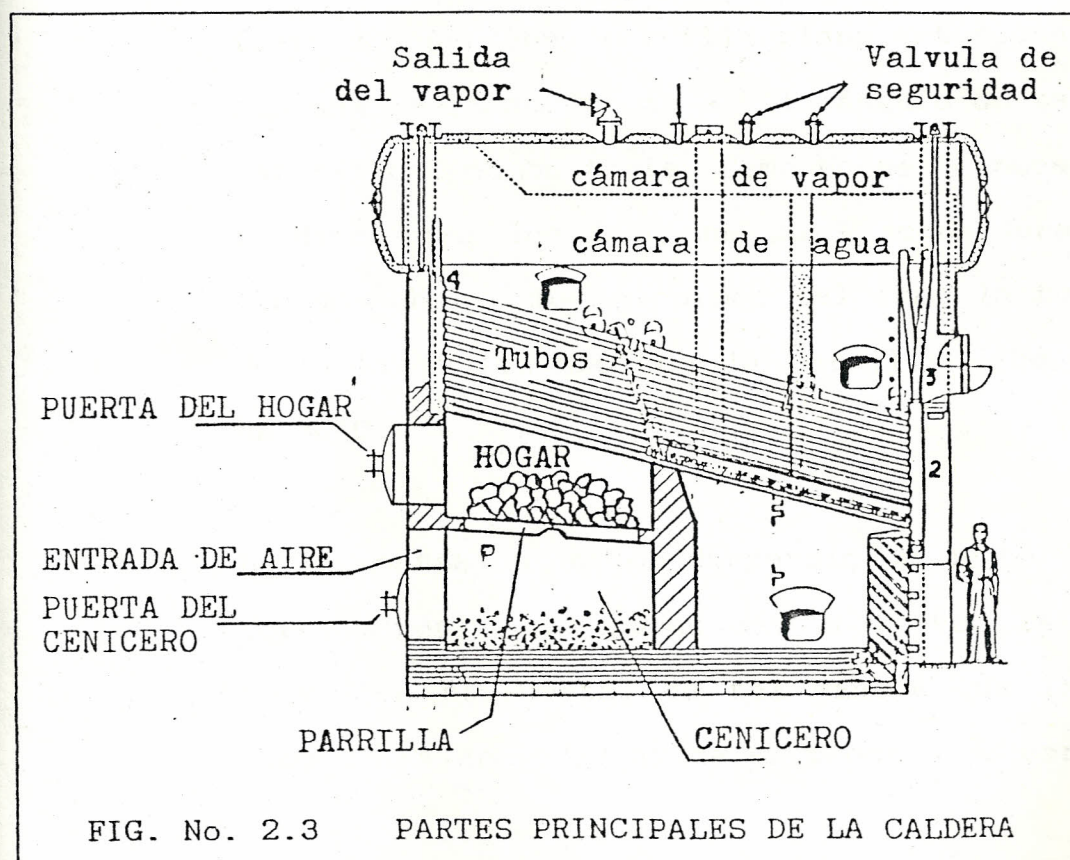
## 2.4 PARTES PRINCIPALES DE LA CALDERA

Pasaremos a enumerar las partes principales de la caldera a diseñarse, para una mejor comprensión de su estructura en la instalación.

### 2.4.1 HOGAR DE LA CALDERA

El fogón u hogar de la caldera es el espacio localizado abajo o a un lado de la misma, en el que se quema el combustible y de donde parten los productos de ésta combustión para pa

sar a la caldera propiamente dicha. El tamaño del hogar depende únicamente de la cantidad y naturaleza del combustible que se quema. En la parte inferior del hogar por debajo de la parrilla, se debe colocar la entrada de aire. Si ésta se produce en forma natural, se acostumbra dejar un hueco de tamaño adecuado en en la parte delantera de la caldera, por donde penetrará el aire necesario para la combustión. En los casos en que el aire penetra en forma forzada, se utilizará el orificio de entrada del aire para colocar en él el inyector



La figura 2.3 indica la puerta del hogar, del cenicero y la entrada del aire.

#### 2.4.2 PARRILLA

Es el lugar construido dentro del hogar, sobre el cual se coloca el combustible sólido a quemar, el que debe ser introducido, dividido convenientemente en trozos pequeños para los efectos de facilitar el proceso de la combustión.

En la posible construcción de éste tipo de caldera de hogar exterior, se tratará de no encarcerar el proyecto, es por lo tanto que se prefiere diseñar con parrilla plana estacionaria con una inclinación igual al ángulo de talud natural del combustible. Como no se conoce éste dato para los DSM, se puede considerar a los desechos como un carbón tal como la turba donde la inclinación de la parrilla debe ser de 30°C. (6).

La alimentación de los desperdicios se hará en forma manual, que puede ser a través de una tolva con compuerta, de tal manera que la acción de la gravedad ayude el proceso de carga.

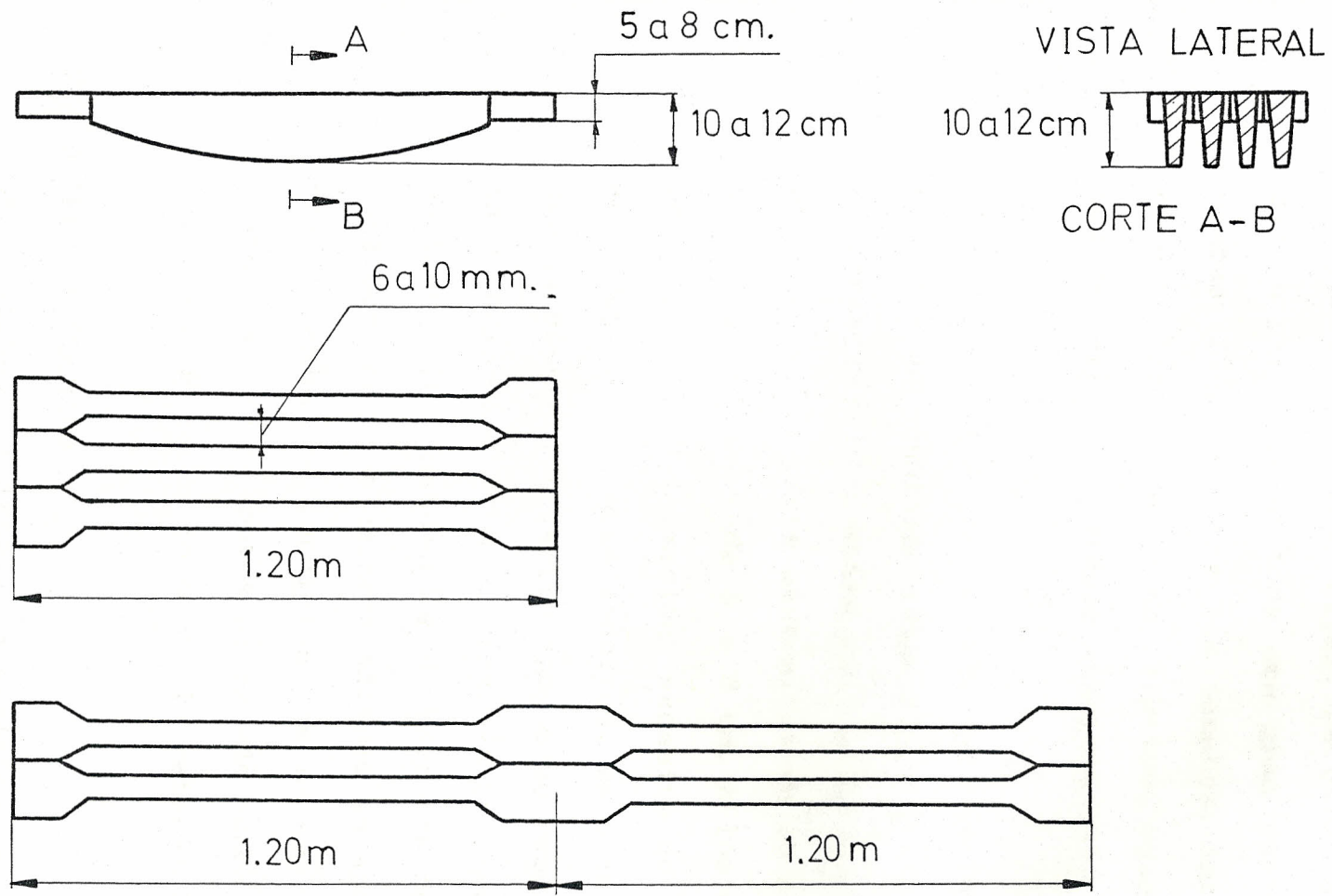


FIG. No. 2.4 BARROTES PARA PARRILLA

Las parrillas planas fijas, de carga a mano, sirven para quemar toda una gran variedad de combustibles de todos los tamaños, incluyendo el cok, las briquetas de lignito, madera, restos de carbón y residuos diversos.

La parrilla está construida por una serie de barrotes de fundición (Figura 2.4), dispuestos en forma paralela entre sí. La altura de los barrotes en la parte central es de 10 a 12 cm. y en los extremos de 5 a 8 cm. A los efectos de evitar una deformación excesiva de los mismos, debido a su gran longitud, es aconsejable que la separación entre apoyos no resulte nunca superior a 1,20 m. Si razones constructivas obligan a la construcción de barrotes de mayor longitud, se debe colocar siempre un apoyo central, también de fundición, de manera que la distancia entre apoyos no exceda nunca del valor indicado, como lo anota la referencia (6).

#### 2.4.3 AREA DE QUEMADO

La capacidad o potencia energética de un combustible sólido, depende ante todo, de la magnitud de la carga sobre la superficie de la parrilla.

La superficie total de parrilla, es la que se encuentra dentro de la cámara de combustión, recubierta de combustible y provista de orificios para el paso del aire. En cambio la superficie libre de parrilla, es la suma de las aberturas de aire en la parrilla (rendijas de parrilla o toberas).

#### 2.4.4 CENICERO

Es la parte de la caldera construida debajo de la parrilla, donde caen las cenizas y escorias del combustible que se está quemando. El piso del cenicero se halla revestida de material refractario.

Periódicamente, se deben retirar del cenicero las escorias y cenizas acumuladas, cantidades éstas que varían según la naturaleza del combustible que se está quemando. Sus dimensiones serán de por lo menos el 70 % del área de quemado y su altura no menor de 50 cm para combustibles sólidos como el carbón. (2).

El llenado de la ceniza en el cenicero se lo debe hacer hasta la mitad de su capacidad antes de vaciarlo, con el fin de permitir la



existencia de una cámara de aire por debajo de la parrilla que favorezca una buena combustión.

#### 2.4.5 PUERTA DEL HOGAR

Es una puerta de forma generalmente circular, colocada por arriba de la parrilla, y que está destinada a permitir la carga y reposición del combustible que se está quemando.

Esta puerta debe abrir siempre hacia adentro, consiguiendo con esto que la misma presión que encierran los gases de combustión la mantengan cerrada.

La carga del combustible de reposición se debe hacer cada 20 ó 30 minutos, procurando que el espesor sobre la parrilla se mantenga uniforme. Así mismo, para diseñar la caldera con alimentador de accionamiento mecánico, la carga de combustible continua permitida, es de 170 a 180 Kg/h.m<sup>2</sup> de carbón moreno alemán cuyo poder calorífico es similar al de la basura. (7).

#### 2.4.6 SUPERFICIE DE CALEFACCION

Se entiende por superficie de calefacción de una caldera aquella que esta por un lado, con

los productos de la combustión, y por el otro, en contacto con el agua a vaporizar. Es la superficie a través de la cual se transmite el calor de la combustión al agua.

La superficie de calefacción total, es la suma de la superficie de calefacción directa más la superficie de calefacción indirecta.

La superficie de calefacción directa, es aquella que recibe calor directamente por la acción de la llama. El calor llega a ella por radiación desde la parrilla, atravesando el espacio ocupado por los gases de combustión, y se propaga por conducción a través del espesor de chapa, para transmitirse finalmente por convección desde la chapa al agua que esta en contacto directo con ella.

La superficie de calefacción indirecta, es la que está en contacto con los gases de combustión. El calor se transmite desde los gases a la chapa, por convección; a través del espesor de la chapa la transmisión se efectúa por conducción, y; finalmente desde ésta al agua que está en contacto con ella, por convección nue

vamente.

#### 2.4.7 DOMO SUPERIOR

El domo también llamado colector de vapor, se lo coloca en la parte superior de las calderas. El objetivo del domo, en el cual va colocada la toma de vapor de la instalación, es alejar más el nivel de la salida del vapor del nivel del agua dentro de la caldera, tratando de lograrse con esto vapor más seco.

Los separadores de vapor (elementos internos de los domos) eliminan el arrastre de humedad y precipitados, purificando el vapor. La figura No.5 indica el equipo interno de los domos. Cada una de las figuras muestra las diferentes formas de separación del vapor, lo que se logra con la instalación de mamparas deflectoras o una combinación de ellas de formas geométricas diferentes.

#### 2.4.8 CHIMENEA

Es un conducto de altura considerable, necesario en toda caldera, por la cual se hace pasar los gases de la combustión, enviándolos a una altura tal que no ocasionen molestias a las

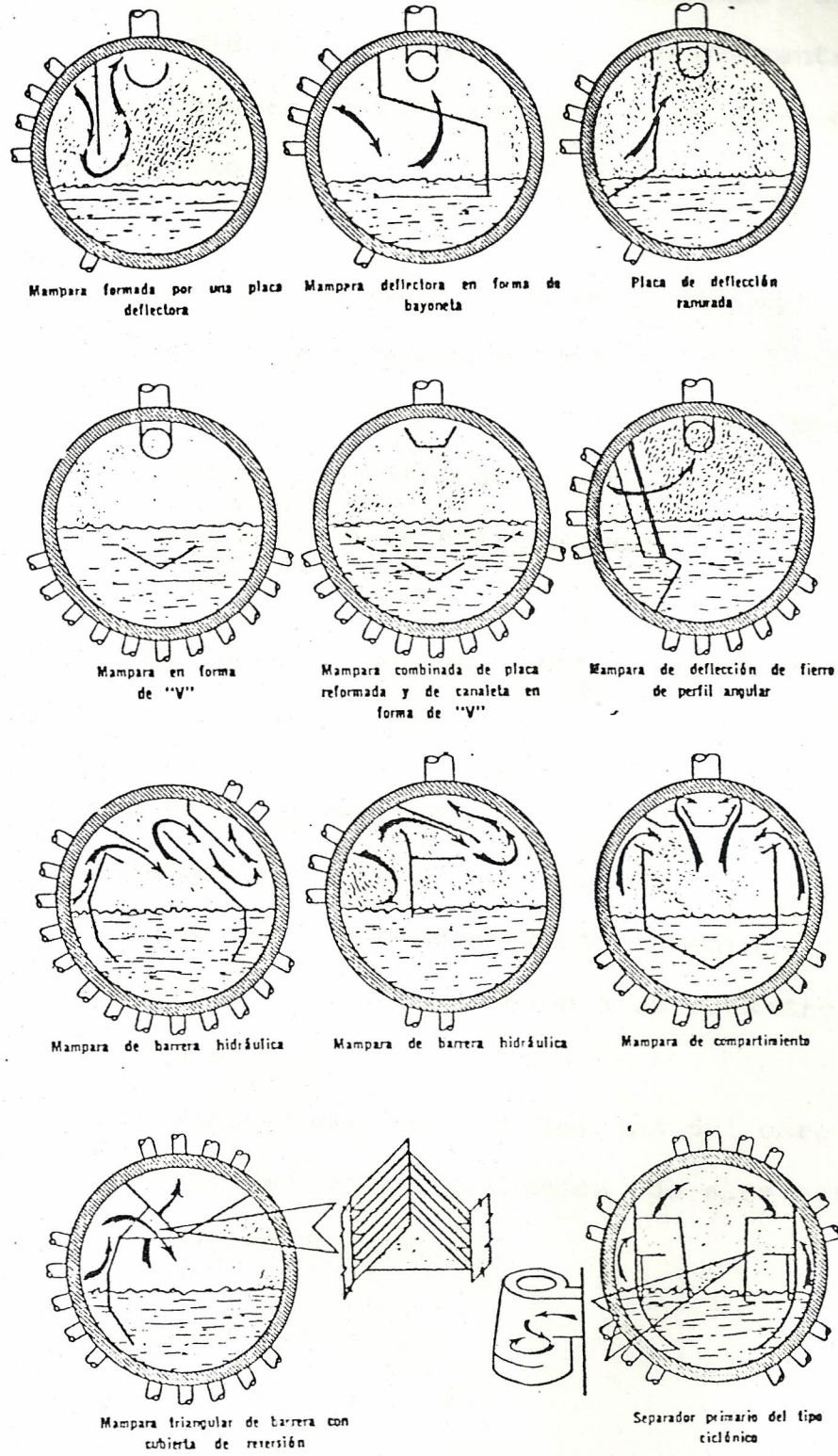


FIG. No. 2.5 Equipo interno de los domos; métodos primarios para la separación del vapor. (8)

personas o construcciones ubicadas en las proximidades de ella. Este elemento, entre las más comunes, pueden ser construidas de acero o ladrillo.

La chimenea desempeña dos funciones básicas:

- 1). Provocar y mantener el tiro  $300^{\circ}\text{C}$ .
- 2). Evacuar a gran altura los humos procedentes de la combustión, para evitar los efectos nocivos de ciertos gases.

A continuación se da ciertas características de las chimeneas:

**a). Chimenea de acero**

**- Ventajas**

- 1). Son autoestables estructuralmente
- 2). Son ligeras en relación a su diámetro y altura
- 3). Exigen menos espacio que las del otro tipo
- 4). Permiten menos filtración de aire externo que las de ladrillo.

**- Desventajas**

- 1). Son antiestéticas
- 2). Los costos de mantenimiento son altos
- 3). Deben construirse en conjunto con materia

les resistentes al calor.

- 4). Deben llevar capas especiales de protección para evitar su rápido deterioro.

#### b). Chimenea de ladrillo

##### - Ventajas

- 1). Para temperaturas menores de 300°C, se emplea ladrillo ordinaria.
- 2). Los costos de mantenimiento son reducidos (Inferior al anterior).
- 3). Son estéticas
- 4). No necesariamente requieren de capas de protección para evitar el deterioro.

##### - Desventajas

- 1). Exige mayor espacio que las de acero.
- 2). Son más pesadas en relación a su diámetro y altura.

Para el caso de instalaciones transportables, es recomendable disponer de una chimenea de acero.

## 2.5 QUEMADOR

Dispositivo destinado a introducir una llama inyectando combustible y aire a velocidades y turbulen

cias que se desean para establecer y mantener una buena ignición y combustión de los materiales.

De acuerdo a la clase de incinerador y tipo de desecho se puede seleccionar el o los quemadores necesarios para la combustión del material a incinerar y su mejor ubicación y arreglo para completar el proceso de la combustión realizando también la combustión secundaria o post-combustión.

Básicamente el quemador consta de un motor eléctrico ventilador y soplador, y la bomba de combustible. Un par de electrodos conectados a un transformador de alto voltaje (10.000 a 15.000 voltios en el secundario), lo cual produce la chispa para la ignición.

El combustible a utilizarse será, el diesel (Fuel oil No. 2), cuyo poder calorífico se determina en el siguiente numeral.

#### 2.5.1 VALOR CALORIFICO DEL DIESEL

Se tiene las siguientes características físico químicas del diesel liviano.

Densidad grados API = 28

Densidad del diesel ( $\delta_a$ ) = 0,879 Kg/ltr.

Composición química, % en peso:

C	S	H	N + O + Cenizas
86,8	0,7	12,3	0,2

Productos de una combustión perfecta, Kg/Kg de diesel:

CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Total
3,202	1,1	10,938	15,24

El porcentaje de calor perdido por la combustión del diesel liviano, está dado por el diagrama de SANKEY (Fig. 2.6), como sigue:

$$Q_k = (H_c + H_q + (Q_s - Q_i))/Q_s \quad ( \% )$$

Siendo:

$Q_k$  = Calor total arrastrado por los productos de combustión, (%)

$Q_s$  = Poder calorífico superior del combustible, 10.749 Kcal/Kg

$Q_i$  = Poder calorífico inferior del combustible, 10.193 Kcal/Kg

$Q_s - Q_i = Q_v$  = Calor latente de vapor de agua, Kcal/Kg

$H_c$  = Calor de los productos de la combustión a 300°C = 1250 Kcal/Kg (Fig. No. 2.7)

$H_q$  = Pérdidas de calor por combustión in



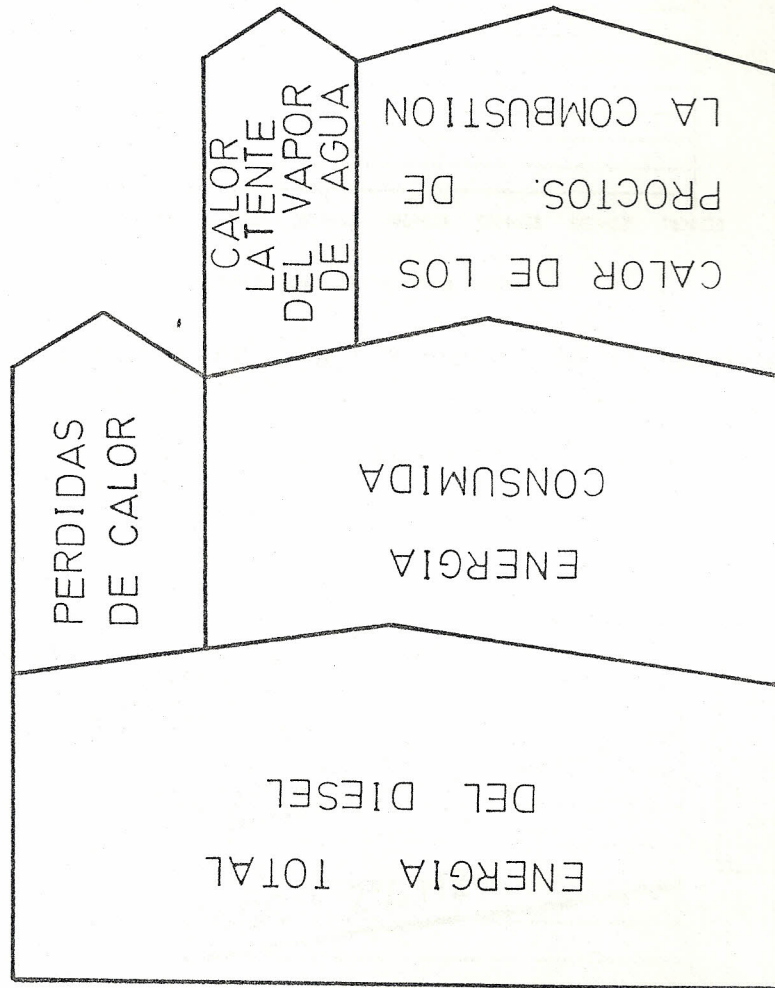
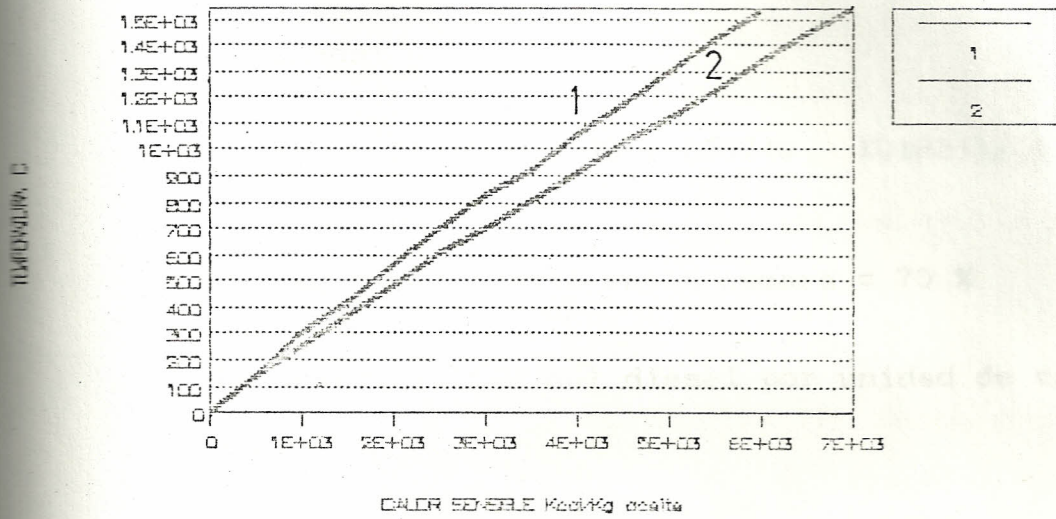


FIG. No. 2.6 DIAGRAMA DE SANKEY



Curva 1: Calor en los productos de la combustión perfecta.

Curva 2: Calor en el aire necesario para la combustión.

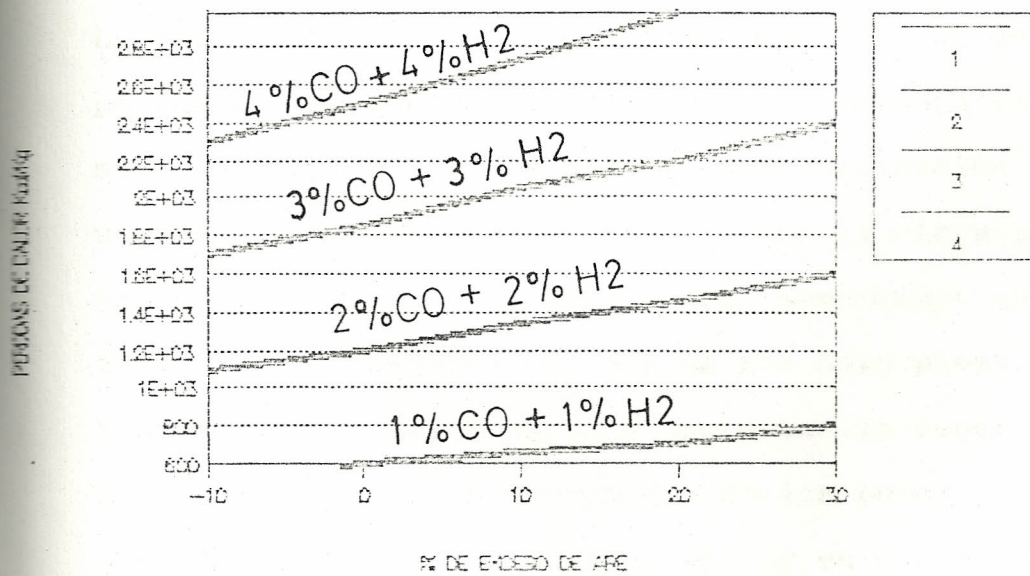


FIG. No. 2.7 CALOR DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DE ACEITE COMBUSTIBLE (FUEL OIL LIGERO)

completa, 2%CO + 2%H<sub>2</sub> y 10% de exceso de aire = 1400 Kcal/Kg (Fig. No. 2.7)

Entonces:

$$Q_K = (1250 + 1400 + (10749 - 10193))/10749$$

$$= 30 \%$$

$$Q_{KU} = \text{Calor útil en la cámara} = 70 \%$$

La energía útil del diesel por unidad de volumen:

$$Q_d = Q_{KU} (\%) \times \delta_a \times Q_s \times 3,7854 \text{ (Kcal/gln)}$$

$$= 0,70 \times 0,879 \times 10749 \times 3,7854$$

$$= 25.040 \text{ Kcal/galón.}$$

## 2.6 ESPECIFICACIONES DE LA CALDERA

La caldera de tubos rectos está constituida de grupos de tubos, que por lo general se disponen en forma alternada: los tubos tienen una inclinación (en un ángulo de 5° a 15°) para facilitar la circulación exterior y en los extremos están insertados en los cabezales. El cabezal (ya sea de una sola pieza, del tipo de caja o seccional), proporciona la superficie necesaria para la interconexión de los tubos. El área de la superficie de calefacción (y en consecuencia la capacidad), se modifica al variar la longitud de los tubos y el número de hileras en ambos sentidos;

es decir, hacia arriba y hacia lo ancho. Los tubos de un diámetro de 76 mm (3") a 101 mm (4"), tienen una separación entre centros de 178 mm (7") a 204 mm (8") horizontalmente, y de 152 mm (6") en dirección vertical. Los tubos son todos del mismo diámetro y de igual longitud, pero nunca son más de 6,0 m (18' a 20') de largo. (8).

La caldera horizontal acuotubular de tubos rectos, se construye para capacidades que fluctúan entre 1814 y 7680 Kg/hr (4000 a 50000 lb/hr) de vapor, aun que ocasionalmente se construyen unidades hasta de 11248 Kg/hr (90000 lb.hr) de vapor. Sus límites de presión se encuentran entre 11,25 y 17,58 Kg/cm<sup>2</sup> (160 a 250 lb/plg<sup>2</sup>), pero pueden encontrarse unidades desde 1 hasta 42,2 Kg/cm<sup>2</sup> (15 hasta 600 lb/plg<sup>2</sup>) de presión. (8).

Como el grado de intensidad calorífica es bajo en una caldera alimentada manualmente, la parrilla puede colocarse a una distancia de 122 a 137 cm (4' a 4 1/2') del cuerpo de una caldera acuotubular horizontal y el calor volumétrico máximo liberado es de 445.000 Kcal/hr.m<sup>3</sup> (50.000 BTU/hr.ft<sup>3</sup>). (9).

## CAPITULO III

### PROCESO DE COMBUSTION

#### 3.1 TIPO Y CANTIDAD DE BASURA A UTILIZARSE

Para la determinación de la cantidad y tipo de basura a utilizarse, se ha tomado como fuente los desechos sólidos producidos en nuestro medio, que por su origen y composición, en la tabla I del Cap. I, corresponde a la basura TIPO 2. La cantidad a ser quemada será la necesitada para cumplir con los requerimientos de demanda de producción de vapor que establece una institución tal como por ejemplo, el HOSPITAL REGIONAL " ISIDRO AYORA" de la ciudad de Loja, con una capacidad de 230 camas; donde las calderas operando diariamente 12 horas tienen una producción bruta de vapor de 2000 Kg/hr, el cual es utilizado en:

- 4 lavadoras (3 grandes y 1 pequeña)
- 6 marmitas
- 2 secadoras
- 1 calentador de agua

Como en el tipo de combustible en el cual se tiene interés es en los DSM, es por eso, que no se considera en éste proyecto los desechos producidos en el hospital, y además por que el diseño de la caldera no es estrictamente para un hospital, sino que puede ser diversa; caso contrario deberá tenerse en cuenta los desechos patológicos del hospital para el diseño del hogar de la caldera.

### 3.2 VALOR CALORIFICO ALTO DE LA BASURA

El valor calorífico alto de la basura tipo 2, se lo puede determinar en base del contenido de humedad y de incombustibles existentes en el rechazo, teniendo así:

$$HHV = 1000 (1 - M - Z)$$

Donde:

$$M = 50\% \text{ (Tabla I)}$$

$$Z = 7\% \text{ (Tabla I)}$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} HHV &= 1000 (1 - 0,5 - 0,07) \\ &= 2384 \text{ Kcal/Kg.basura} \\ &= (4300 \text{ BTU/lb.basura}) \end{aligned}$$

Este valor corresponde al indicado en la Tabla I para la basura de éste tipo, más para los cálculos realizados en el diseño, se toma el valor calorífico in

dicado en la Tabla IV del Cap I, que es de 2472 Kcal/Kg.basura (4450 BTU/lb.basura), ya que es ésta tabla (análisis último y próximo de los DSM), la que se utilizara en los cálculos de la combustión.

### 3.3 COMBUSTION DE LA BASURA

El estudio de la combustión permite obtener:

- 1.- La cantidad de aire necesario
- 2.- La cantidad de los productos de la combustión
- 3.- Calor desprendido durante el proceso

La energía es liberada dentro del hogar de la caldera por la combustión química de los elementos combustibles - carbón, hidrógeno y azufre - con el oxígeno del aire.

Para quemar completamente un combustible, cuatro condiciones básicas deben considerarse:

- 1.- Suministrar suficiente aire
- 2.- Mezcla perfecta del combustible y aire
- 3.- Mantener al horno a temperatura suficientemente alta para encender la mezcla combustible - aire
- 4.- Proveer a los gases de combustión tiempo de residencia suficiente en el hogar para completar las reacciones de combustión.

### 3.4 REQUERIMIENTOS DE AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTION

Conociendo la composición del combustible, se puede calcular la cantidad de aire teórico para la combustión.

#### a). Aire teórico

El aire teórico requerido para la combustión completa de un combustible conteniendo oxígeno, carbón, hidrógeno y azufre como elementos combustibles, se puede calcular por la siguiente ecuación simplificada:

$$W_a = 11,53 (C) + 34,46 \left( H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 4,32 (S)$$

Utilizando la Tabla IV, se tiene:

$$\begin{aligned} W_a &= 11,53 (0,256) + 34,46 \left( 0,034 - \frac{0,203}{8} \right) \\ &\quad + 4,32 (0,0015) \\ &= 3,3 \text{ Kg aire/Kg basura} \\ &= (3,3 \text{ lb aire/lb basura}) \end{aligned}$$

#### b). Consumo total de aire. ( 11 )

El consumo total de aire o aire real se calcula mediante la ecuación:



$$Ar = Wa \left( 1 + \frac{EA}{100} \right) \text{ (Kg aire/Kg basura)}$$

En el literal 2.1.2 del Cap. II, se indicó un rango típico de exceso de aire para la combustión de los DSM, con esto, se puede considerar un EA = 75% para propósitos de cálculos de la combustión.

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} Ar &= 3,3 \left( 1 + \frac{75}{100} \right) \\ &= 5,775 \text{ Kg aire/Kg basura} \\ &= (5,775 \text{ lb aire/lb basura}) \end{aligned}$$

### 3.5 PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

La cantidad y temperatura de los productos de la combustión de la basura en condiciones normales (0°C/760 mm Hg) están basados en los siguientes cálculos:

#### 3.5.1 MASA DE LOS HUMOS DE LA COMBUSTION

La masa de los humos de la combustión en función de la cantidad de basura a quemarse está dada por:

$$Wh = Wair + Wf$$

$$\begin{aligned}
 W_h &= W_f \times A_r + W_f \\
 &= W_f (5,775 + 1) \\
 &= 6,775 W_f \text{ Kg humos/hr} \\
 \text{ó} &= 6,775 \text{ Kg humos/Kg basura}
 \end{aligned}$$

### 3.5.2 COMPOSICION DE LOS HUMOS

Es de fundamental importancia el análisis de las emisiones productos de las reacciones de la combustión, para la determinación del calor útil que se aprovecha de los gases de desecho. Para éste propósito, se utilizará la Tabla B del apéndice que lista los elementos químicos y componentes encontrados en combustibles generalmente usados en la generación de calor comercial con sus pesos moleculares, calores de combustión, y otras constantes de combustión. Ver Tabla V

### 3.6 TEMPERATURA ADIABATICA DE LA LLAMA (5)

La temperatura adiabática de la llama, puede ser aproximada usando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 T_{ad} &= 2794 - 8,224 (\%EA) \\
 &= 2794 - 8,224 (75) \\
 &= 1192^{\circ}\text{C} \quad (2177^{\circ}\text{F})
 \end{aligned}$$

TABLA V A.- METODO MOL - COMBUSTIBLE SOLIDO - AIRE ESTANDAR  
(ASUMIENDO COMBUSTION COMPLETA)

Analisis Ultimo Kg/100 Kg comb.	Moles por 100 Kg de combustible	Requerido para combustion Moles/100 Kg combustible. a 100% aire total.	
		O <sub>2</sub>	Aire Seco
C	25.6 : 12 = 2.13 x 1.0 y 4.76	2.13	10.15
H <sub>2</sub>	3.4 : 2.02 = 1.69 x 0.5 y 2.38	0.48	4.01
O <sub>2</sub>	20.3 : 32 = 0.63	--	--
N <sub>2</sub>	0.5 : 28 = 0.018	--	--
S	0.15 : 32 = 0.0047 x 1.0 y 4.7	0.0047	0.022
H <sub>2</sub> O	25.2 : 18 = 1.4	--	--
Cenizas	24.4 --	--	--
		5.88	14.20
		2.95	14.20
Perdidas de O <sub>2</sub> en combustible		-0.63	-3.00*
Requerido ( a 100 % aire total )		2.32	11.20

\* Aire equivalente de O<sub>2</sub> en el combustible.  
= 0.63 x 4.76 = 3.00 mol aire / 0.63 mol O<sub>2</sub>

B.- PARA EA = 75 %, TENEMOS :

	Requerido para Combustion Mols / 100 Kg a 175 % aire total	
	O <sub>2</sub>	Aire Seco
O <sub>2</sub> y aire x 175/100, total	4.06	19.6
Exceso de aire = 19.6 - 11.20	--	8.4
Exceso de O <sub>2</sub> = 4.06 - 2.32	1.74	--

C.- Productos de la Combustion:

	Moles/100 Kg. comb.	% por Vol Base seca	% por Vol Base humeda
CO <sub>2</sub> 2,13 x 1	2.13	11.6	9.74
H <sub>2</sub> O 1,69 x 1 + 1,4 + 0,41*	3.50	--	16.0
SO <sub>2</sub> 0,0047 x 1	0.0047	0.026	0.0215
N <sub>2</sub> 19,6 x 0,74	14.504	79.0	66.3
O <sub>2</sub> ( exceso )	1.74	9.47	7.95
Humedo	21.88	100.0	100.0
Seco = 21.88 - 3.50	18.38		

\* = Moles de H<sub>2</sub>O en aire  
= (19,6 x 29 x 0.013) : 18 = 0.41

## CAPITULO IV

### PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

#### 4.1 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO

El objetivo de éste proyecto es el "Diseño de una Caldera Acuotubular de tubos rectos de hogar exterior de un sólo domo longitudinal", que aprovecha la energía térmica liberada por la combustión de los desechos municipales Tipo 2 que se producen en la ciudad de Guayaquil.

El proceso de la combustión se lo realiza en un hogar de pared de refractario con parrilla plana con leve inclinación hacia adelante, cuyo sistema de alimentación será manual, pudiendose construir para ello una tolva de carga en que la acción de la gravedad ayudará a introducir el combustible dentro del hogar y sobre la parrilla.

Para el cálculo de los diferentes componentes de la caldera, se sigue una secuencia lógica de procedimiento de diseño, que se describe a continuación:

- 1 .- Establecer capacidad de la caldera a diseñar
- 2 .- Calcular el calor necesario para vaporizar el agua
- 3 .- Asumir una eficiencia de la caldera; usualmente se empiezan los cálculos con 60 % (8).
- 4 .- Determinar la cantidad de desecho a utilizarse
- 5 .- Calcular la masa de los humos
- 6 .- Calcular el área de parrilla
- 7 .- Determinar el volumen del hogar
- 8 .- Dimensionar la cámara de combustión
- 9 .- Calcular la temperatura de los gases a la salida del fogón o entrando a la zona de convección
- 10.- Calcular el número de tubos en la zona de convección
- 11.- Calcular el calor transmitido por convección
- 12.- Calcular el calor transmitido por radiación
- 13.- Realizar un balance de calor en la caldera y determinar  $W'$
- 14.- Si la diferencia entre  $W$  y  $W'$  está dentro del 3 % , la eficiencia asumida es aceptable, en caso contrario, asumir un nuevo valor para la eficiencia global de la caldera y repetir los cálculos.

#### 4.2 DATOS PARA EL DISEÑO

La información dada a continuación son los datos a

utilizarse en los diferentes cálculos del diseño de la caldera acuotubular de tubos rectos.

1. Presión de operación: 15 Kg/cm<sup>2</sup>
2. Condiciones del agua:
  - Densidad ( $\delta_a$ ): 1000 Kg/m<sup>3</sup>
  - Temperatura : 30°C (86°F)
3. Gases de combustión : 6,775 Kg humos/Kg basura  
11,6 % CO<sub>2</sub> base seca (ver Tabla V)
4. Exceso de aire : 75 %
5. Descarga del vapor : Saturado, 2000 Kg/hr
6. Características de los tubos
  - Diámetro exterior :  $D_e = 101,6$  mm (4 plg)
  - Diametro interior :  $d_i = 85,4$  mm (3,364 plg)
  - Longitud del tubo :  $L_t = 6,0$  m (18 ft)
  - Material del tubo : Acero al carbono

### 4.3 CALOR DE VAPORIZACION

El calor necesario para la producción de 2.000 Kg/hr (4.409 lb/hr), de vapor saturado a 15 atmósferas (214,7 psia), con una temperatura de entrada del agua de alimentación de 30°C, se lo determina con la siguiente relación:

$$Q_v = W (h_2 - h_1)$$

Siendo:

$$W = 2.000 \text{ Kg/hr}$$

$$h_2 = 666,28 \text{ Kcal/Kg a } 15 \text{ atm. (Tablas de vapor)}$$

$$h_1 = 30 \text{ Kcal/Kg a } 30^\circ\text{C (Tablas de vapor)}$$

Sustituyendo:

$$Q_v = 2.000 (666,28 - 30)$$

$$Q_v = 1.272.560 \text{ Kcal/hr}$$

$$= (5.050.000 \text{ BTU/hr})$$

#### 4.4 CANTIDAD DE DESECHO A UTILIZARSE

Este valor es encontrado en función de la carga o producción de vapor a utilizarse en la caldera.

O sea:

$$W_f = \frac{Q_v}{\eta \times \text{HHV}}$$

Donde:

$$Q_v = 1.272.560 \text{ Kcal/hr}$$

$$\eta = \text{Eficiencia asumida, } 60 \%$$

$$\text{HHV} = 2.472 \text{ Kcal/kg}$$

Reemplazando:

$$W_f = \frac{1.272.560}{0,6 \times 2.472}$$

$$= 858 \text{ Kg/hr (1892 lb/hr)}$$

#### 4.5 FLUJO MASICO DE HUMOS

Del literal 3.5.1 del Cap. III obtuvimos una masa de humos de :  $W_h = 6,775 \text{ Kg humos/Kg basura.}$

Para obtener la masa de los humos en función del tiempo realizamos la siguiente operación:

$$\begin{aligned} \dot{W}_h &= W_h \times W_f \\ &= 6,775 \times 858 \\ &= 5.813 \text{ Kg humos/hr} \quad (12.815 \text{ lb/hr}) \end{aligned}$$

#### 4.6 CALCULO DE LA SUPERFICIE DE LA PARRILLA

En la guía de ASHRAE\* se recomienda que la superficie de la parrilla plana estacionaria para alimentación manual de combustibles sólidos, no sea menor que la obtenida por la ecuación:

$$A_p = \frac{Q_v}{\eta \times \text{HHV} \times C_c}$$

Donde:

$$Q_v = 1.272.560 \text{ Kcal/hr}$$

$$\eta = \text{Eficiencia asumida, } 60 \%$$

$$\text{HHV} = 2.472 \text{ Kcal/Kg}$$

---

\* Sociedad Americana de Ingenieros para Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado.



$C_c$  = Coeficiente de combustión, que para éste tipo de instalación se recomienda una carga de 180 Kg/hr.m<sup>2</sup> de parrilla. Consulte referencia (7)

#### 4.7 VOLUMEN DEL HOGAR

Para el cálculo del volumen del hogar se toma en cuenta las siguientes relaciones:

##### 1.- Volumen ocupado por la basura

Es importante determinar el volumen ocupado por la basura depositada sobre la superficie de la parrilla ya que el volumen del hogar está en función de éste parámetro.

$$V_b = W_f / \delta$$

Donde:

$$W_f = 858 \text{ Kg/hr}$$

$$\delta = \text{Peso específico de la basura como se presenta a quemar, } 280,9 \text{ Kg/m}^3 \text{ de la Tabla II del Cap I para basura TIPO 2}$$

Reemplazando:

$$\begin{aligned} V_b &= 858 / 280,9 \\ &= 3,06 \text{ m}^3 \\ &= (108 \text{ ft}^3) \end{aligned}$$

## 2.- Volumen del horno

Es necesario para una buena combustión, que el volumen de la cámara sea por lo menos 2,5 veces el volumen de la basura, con esto:

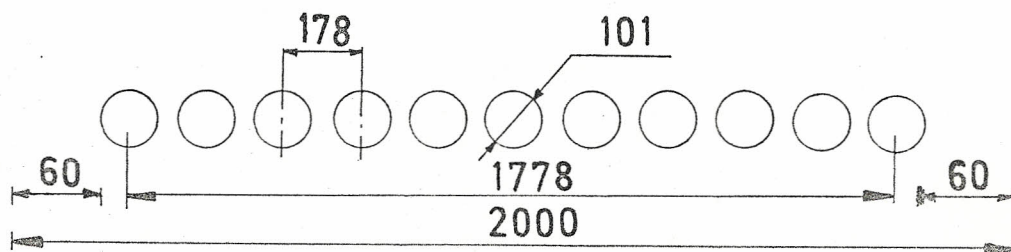
$$\begin{aligned} V_h &= 2,5 \times V_b \\ &= 2,5 \times 3,06 \\ &= 7,65 \text{ m}^3 \quad (270,2 \text{ ft}^3) \end{aligned}$$

## 4.8 DIMENSIONAMIENTO DE LA CAMARA

Con los valores encontrados de la parrilla y el volumen del horno, y basados en la información referente a las especificaciones dadas en el literal 2.4.2 del Cap. II, y dado que la longitud de los barrotes es un múltiplo de 1,2 m, podemos dimensionar el hogar de la manera siguiente:

Ancho : Ancho de parrilla = 2,4 m  
 Profundidad: Profundidad de parrilla = 2,0 m  
 Altura : Volumen del hogar/ $A_p$  = 1,6 m

Una distribución de los tubos en la zona de convección para una profundidad de 2,0 m puede ser:



## 4.9 TEMPERATURA DE LOS GASES ( 11 )

Para encontrar la temperatura de los gases a la salida del fogón o entrando a la zona de convección de la caldera se realiza un cálculo iterativo con las relaciones que se indican a continuación, para lo cual se parte de un valor de temperatura de los gases asumido.

Una relación empírica es la razón de la temperatura de los gases a la salida del fogón a la temperatura adiabática de la llama  $T_e/T_{ad}$  que es:

$$\frac{T_e}{T_{ad}} = \frac{1}{\left[ \frac{1,27 \times 10^{-8} \cdot \zeta \cdot A_p \cdot a_f \cdot T_{ad}^3}{\phi \times W_f \times \bar{V}_c} \right]^{0,6} + 1}$$

Donde:

$\zeta$  es el factor de suciedad del fogón, y vale para:

Combustibles gaseosos = 1,0

Combustibles líquidos = 0,9

Combustibles sólidos = 0,7

$$a_f = \frac{0,82 \epsilon_f}{\epsilon_f + (1 - \epsilon_f) \cdot \Psi \cdot \zeta}$$

$\Psi$  = relación de área radiante a área total

$\bar{V}_c$  = Calor específico medio de los productos de la combustión, basados en 1 Kg de combustible.

$$= \frac{q_f - h_e}{t_{ad} - t_e}$$

$q_f$  = Calor útil liberado en el fogón, Kcal/Kg

$h_e$  = Calor de los gases saliendo del fogón po Kg de combustible

$A_p$  = Area de calefacción de radiación sensitiva del fogón

$t_{ad}$  = Temperatura adiabatica de la flama, 1192°C

$t_e$  = Temperatura de los gases a la salida del fogón  
°C o  $T_e$  en °K

La emisividad de la flama gaseosa es evaluada como:

$$\epsilon_f = \beta (1 - e^{-KPL})$$

$\beta$  caracteriza los volúmenes de la flama

= 1,0 para flamas no - luminosas

= 0,75 para flamas luminosas hollinientas de combustibles líquidos

= 0,65 para flamas luminosas y semi-lumninosas de combustibles sólidos

$L$  = Longitud del haz luminoso, m

= 3,4 x volumen del fogón/área de la superficie

$K$  = Factor de atenuación, el cual depende del tipo de combustible y presencia de cenizas y su con

centración. Para flama semi-luminosa, el tamaño de la partícula de ceniza y concentración entran en los cálculos:

$$K = \frac{(0,8 + 1,6 P_w)}{\sqrt{(P_c + P_w) \cdot L}} (1 - 0,38 T_e/1000)(P_c + P_w) + 7 \mu \left( \frac{1}{d_m \cdot T_e} \right)^{2/3}$$

$d_m$  = es el diámetro específico medio de la partícula de ceniza en micras  
 = 20 para combustión de carbón molido en molinos de martillo.

$\mu$  = concentración de la ceniza, gm/Nm<sup>3</sup>

El calor útil puede ser calculado como sigue:

$$q_f = HHV - 1040 (9H_2) + 0,24 W_r (t_{ah} - t_a)$$

Donde  $t_{ah}$  es igual a  $t_a$  ya que no se considera en el diseño del precalentador de aire, por lo tanto:

$$\begin{aligned} q_f &= 4450 - 1040 \times 9 \times 0,034 \\ &= 2300 \text{ Kcal/Kg} \quad (4132 \text{ BTU/lb}) \end{aligned}$$

Además tenemos que:

- Masa de gases.  $W_h = 6,775 \text{ Kg humos/Kg basura}$
- Area proyectada efectiva en el hogar, (de la distribución de tubos en la zona de convección)

$$\begin{aligned}
 A_{cp} &= (N_p \times St + De) \times L_r \\
 &= (10 \times 7 + 4) \times 6 / (10,765 \times 12) \\
 &= 3,437 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

- Area Re - radiante

$$\begin{aligned}
 ARR &= 2 (2,4 \times 1,6 + 1,6 \times 2,0) + 4,8 \\
 &= 18,88 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

- Relación de área radiante a área total

$$\psi = \frac{18,88}{3,437} = 5,50$$

Asumiendo:

$$\begin{aligned}
 T_e &= 1800^\circ\text{F} = 982^\circ\text{C} = 1255^\circ\text{K} \\
 C_{pm} &= 0,3 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \quad (0,3 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}) \\
 h_e &= 6,775 \times 0,3 \times (1800 - 32) \\
 &= 2000 \text{ Kcal/Kg} \quad (3600 \text{ BTU/lb})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_b &= \frac{2300 - 2000}{1192 - 982} \\
 &= 1,43 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\mu = \frac{1000 \times (1 - \%Ceniz) \times (\%Ceniz)}{W_h / \delta_g}$$

Donde, la densidad de los gases de combustión es:

$$\begin{aligned}
 \delta_g &= \frac{Pa}{R \cdot T} = \frac{144 \times 14,7}{53,3 \times 492} \\
 &= 1,3 \text{ Kg/Nm}^3 \quad (0,0808 \text{ lb/ft}^3)
 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1000 (1 - 0,244)(0,244)}{6,775/1,3} \\ &= 35,4 \text{ g/Nm}^3\end{aligned}$$

Ahora, teniendo:

$$\begin{aligned}d_m &= 20 \\ P_w &= 0,16 \quad (\text{Tabla V.c}) \\ P_c &= 0,0974 \quad (\text{Tabla V.c}) \\ L &= 3,4 \times 7,65 / 4,8 = 5,42 \text{ m} \\ P \times L &= 5,42 \times 3,28 (0,16 + 0,0974) \\ &= 4,58 \text{ atm - ft}\end{aligned}$$

Calcular:

$$\begin{aligned}K &= \frac{(0,8 + 1,6 \times 0,16) [1 - 0,38(1,255)] \times 0,2574}{\sqrt{0,2574 \times 5,42}} \\ &+ 7 \times 35,4 \left( \frac{1}{20 \times 1255} \right)^{2/3} \\ &= 0,41\end{aligned}$$

$$\text{Entonces: } \epsilon_f = 0,65 (1 - e^{-0,41 \times 4,58})$$

$$\psi = 5,50$$

$$\zeta = 0,7$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}a_f &= \frac{0,82 \times 0,55}{0,55 + (0,45 \times 5,5 \times 0,7)} \\ &= 0,198\end{aligned}$$

Reemplazando éstos valores en la relación  $T_e/T_{ad}$ :

$$\frac{T_e}{T_{ad}} = \frac{1}{\left[ \frac{1,27 \times 10^{-8} \times 0,7 \times 4,8 \times 0,198 \times (1465)^3}{858 \times 1,43} \right]^{0,6} + 1}$$

$$= 0,909$$

$$T_e = 0,909 \times 1465 = 1331,5^\circ\text{K} = 1058,5^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, el valor asumido de  $t_e = 982^\circ\text{C}$  no corresponde al valor encontrado de  $t_e = 1058,5^\circ\text{C}$ , lo que hace necesario que se repita el cálculo con un nuevo valor asumido.

Finalmente, se encuentra que la temperatura de los gases a la salida del fogón es de  $t_e = 1045^\circ\text{C}$ , obteniéndose previamente los siguientes valores:

$$h_e = 2124 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\bar{V}_c = 1,17 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$K = 0,395$$

$$\epsilon_r = 0,5432$$

$$a_r = 0,194$$

$$T_e/T_{ad} = 0,8996$$

$$T_{ad} = 1465^\circ\text{C} = 1192^\circ\text{C} = 2177,2^\circ\text{F}$$

$$T_e = 1318^\circ\text{K} = 1045^\circ\text{C} = 1913^\circ\text{F}$$



Con el valor encontrado de  $t_e = 1045^\circ\text{C}$  ( $1913^\circ\text{F}$ ) de terminamos en la Fig. VI la energía sensible de los gases de combustión, que es de aproximadamente 287 Kcal/Kg (517 BTU/lb).

Conociendo el vapor producido de  $W = 2000$  Kg/hr, entonces cada Kg de gases de combustión puede luego transferir a los tubos en la zona de convección por radiación y convección:

$$W \times h_{f_g} = \dot{W}h \times \Delta h$$

ó

$$\Delta h = \frac{W \times h_{f_g}}{\dot{W}h}$$

$$= \frac{2000 \times (666,28 - 30)}{5813}$$

$$= 219 \text{ Kcal/Kg} \quad (394 \text{ BTU/lb})$$

La energía de los gases de combustión entrando a la zona de convección fue calculada como 517 BTU/lb.

Luego la energía saliendo de la zona de convección será  $517 - 394 = 123$  BTU/lb. Desde la Fig. 4.1 ésta representa una temperatura de  $565^\circ\text{F}$  que es la temperatura de  $565^\circ\text{F}$  que es la temperatura de los gases a la salida de la zona de convección, o sea  $t_{e_s} = 296^\circ\text{C}$  ( $565^\circ\text{F}$ ).

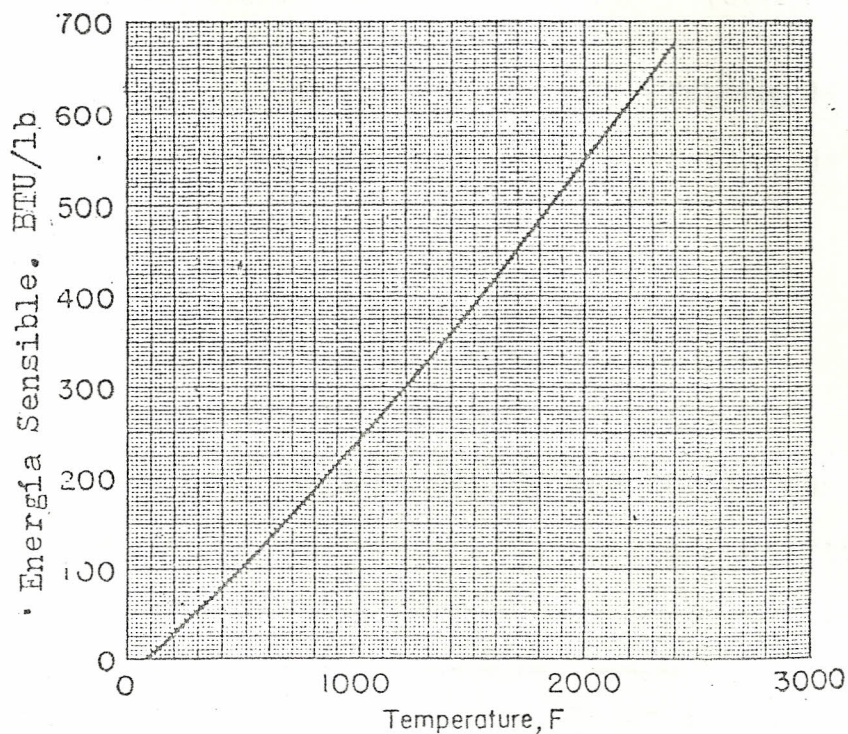


FIG. No. 4.1 ENERGIA SENSIBLE DE LOS GASES DE COMBUSTION SOBRE LOS 80°F. (12)

#### 4.10 CALCULO DE LOS TUBOS

Para determinar el número de tubos en la zona de convección, se cuenta con los siguientes datos:

$$W = 2000 \text{ Kg/hr}$$

Tubos:  $D_e = 101,6 \text{ mm (4 plg)}$

$$d_i = 85,4 \text{ mm (3,364 plg)}$$

$$L_t = 6,0 \text{ m (18 ft)}$$

Area de flujo:

$$0,7854 \times (85,4)^2 = 5734 \text{ mm}^2 \quad (0,062 \text{ ft}^2)$$

$$\text{Presión de operación} = 15 \text{ Kg/cm}^2 \quad (200 \text{ psig})$$

Temperatura a 15 atms = 198°C (388°F)

$$\gamma_f = 1/v_f = 867,4 \text{ Kg/m}^3 \text{ (Tablas de vapor)}$$

$$\gamma_g = 1/v_g = 7,53 \text{ Kg/m}^3 \text{ (Tablas de vapor)}$$

$$h_{fg} = 465,22 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\gamma_{mezcla} = \gamma_f - \frac{\% \text{ SBV } (\gamma_f - \gamma_g)}{100} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Donde: % SBV descargando de los tubos, máximo recomendado es de 81,6 (Fig. 4.2 presión de 215 psia).

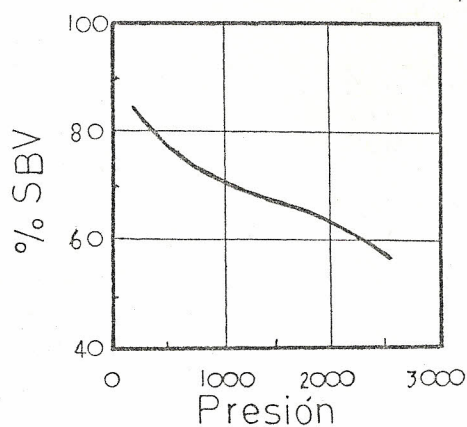


FIG. No. 4.2 % SBV MAXIMO RECOMENDADO PARA VARIAS PRESIONES. (13).

$$\begin{aligned} \gamma_{mezcla} &= 867,4 - \frac{81,6 (867,4 - 7,53)}{100} \\ &= 165,75 \text{ Km/m}^3 \text{ (10,35 lb/ft}^3\text{)} \end{aligned}$$

El porcentaje de vapor por peso (calidad del vapor), se lo determina por la relación:

$$\begin{aligned} \% \text{ SBW} &= \frac{\% \text{ SBV} \times \gamma_g}{\gamma_{\text{mezcla}}} \\ &= \frac{81,6 \times 7,53}{165,75} = 3,7 \% \end{aligned}$$

De donde,

Kg vapor/Kg mezcla, descargando de los tubos ascendentes = 0,037

Relación de circulación\* = 1/0,037  
= 27 Kg mezcla /Kg vapor  
producido

Flujo total en el circuito = W x R.C  
= 2000 x 27  
= 54000 Kg mezcla/hr

Flujo en cada tubo:

$$G_1 = \gamma_{\text{mezcla}} \times V_1 \times S_1$$

Donde:

$$\gamma_{\text{mezcla}} = 165,75 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_1 = \text{Velocidad del agua,} \\ 0,316 \text{ m/s (1,035 ft/s)}$$

$$S_1 = 5734 \text{ mm}^2 \text{ (0,062 ft}^2\text{)}$$

$$G_1 = 1080 \text{ Kg/hr (2380 lb/h)}$$

---

\* Relación en peso, entre el agua alimentada a los tubos de generación de vapor y el vapor generado al mismo tiempo (Kg agua/Kg vapor), recibe el nombre de relación de circulación.

Por lo tanto el número de tubos será:

$$N = \frac{\text{Flujo total en el circuito}}{\text{Flujo másico en cada tubo}}$$

$$= \frac{54.000}{1.080}$$

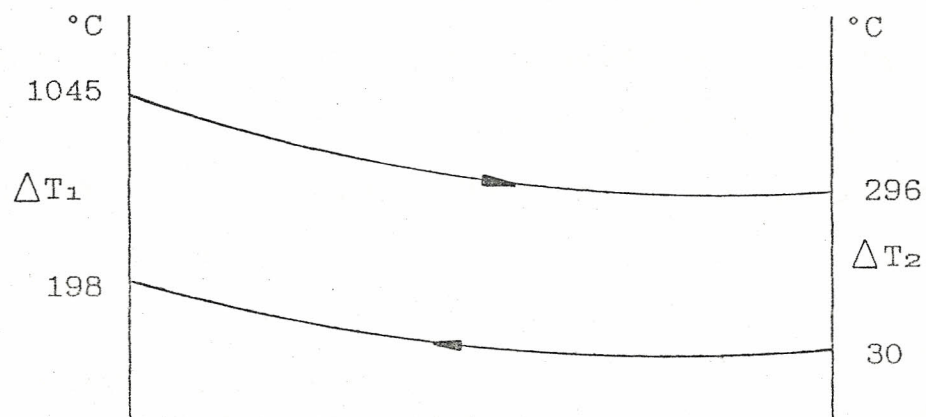
$$N = 50 \text{ Tubos}$$

#### 4.11 CALOR TRANSMITIDO POR CONVECCION

Para calcular el calor transmitido por convección se sigue el procedimiento detallado a continuación.

a) Cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (MLTD)

Si la temperatura del tubo es la misma que la temperatura del agua ( $198^{\circ}\text{C}$ ), y omitiendo las resistencias de la película del agua y del metal, MLTD es:



$$MLTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln (\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = 847^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 266^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} MLTD &= \frac{847 - 266}{\ln (847/266)} \\ &= 501,6^\circ\text{C} \quad (935^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

### b) Superficie de calefacción

Como la superficie de calefacción de una caldera se la mide siempre del lado de la fuente caliente, tenemos que con un número de 50 tubos y diámetro exterior de 101,6 mm la superficie de calefacción es:

$$\begin{aligned} A_o &= 50 \times 3,14 \times 101,6 \times 5,5/1000 \\ &= 87,8 \text{ m}^2 \quad (945 \text{ ft}^2) \end{aligned}$$

### c) Cálculo del coeficiente de convección. Lado-Gas

La transferencia de calor en la zona de convección tiene lugar por convección y radiación. Para la transferencia de calor por convección a los tubos de la caldera es usual omitir la resistencia de la película del agua en el interior de los tubos y la resistencia del metal; luego  $U_o$  viene a ser igual a  $h$  en el número de Nusselt.

Para esto determinamos:

1. Temperatura de la masa del fluido.

$$T_b = (1/2)((1045 + 296)/2 + 198)$$

$$= 434,2^\circ\text{C} \quad (813,5^\circ\text{F})$$

2. Propiedades de los gases. (11)

$$C_p = 0,3 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \quad (0,3 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F})$$

$$\mu_g = 0,11 \text{ Kg/m hr} \quad (0,074 \text{ lb/ft hr})$$

$$K_g = 0,0408 \text{ Kcal/hr m}^\circ\text{C} \quad (0,0274 \text{ BTU/hr ft}^\circ\text{F})$$

$$Pr = C_p \times \mu_g / K_g = 0,82$$

3. Flujo másico de los gases.

$$W_h = 5813 \text{ Kg/hr}$$

4. Area de flujo. (de la distribución de los tubos en la zona de convección)

$$A_f = \left[ 10 \times \frac{3}{12} \times 6 + 2 \times \frac{2,4}{12} \times 6 \right] \times \frac{1}{10,765}$$

$$= 1,6 \text{ m}^2 \quad (17,4 \text{ ft}^2)$$

5. Determinar la velocidad másica

$$G_z = W_h / A_f$$

$$= 5813 / 1,6 = 3630 \text{ Kg/hr m}^2$$

$$= (774 \text{ lb/hr ft}^2)$$

6. Número de Reynolds.

$$Re = \frac{G_z \times D_e}{12 \times \mu_g} = \frac{744 \times 4}{12 \times 0,074} = 3350$$

7. Número de Nusselt. (para  $2000 < Re < 20000$ )

$$\text{Nu} = \frac{h_o \times D_e}{12 \times K_g} = 0,35 F_H \times \text{Re}^{0,6} \text{Pr}^{0,3}$$

Para arreglo escalonado:

$$\text{con } S_t/D_e = 1,75$$

$$S_l/D_e = 1,50$$

Entonces  $F_H = 1,08$  (Tabla C Apéndice)

Por lo tanto:

$$h_o = 0,35 \times 1,08 \times (3350)^{0,6} (0,82)^{0,3} \times 12 \times 0,0274/4$$

$$\begin{aligned} h_o = U_o &= 18,12 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= (3,71 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

La transferencia de calor por convección es entonces:

$$\begin{aligned} Q_c &= U_o \times A_o \times \text{MLTD} \\ &= 3,71 \times 945 \times 935 \\ &= 826.072 \text{ Kcal/hr } (3.278.063 \text{ BTU/hr}) \end{aligned}$$

#### 4.12 CALOR TRANSMITIDO POR RADIACION

Los gases absorben e irradian energía para bandas de longitud de onda intermitente. La radiación en la banda infrarroja desde los gases tiene que ser reconocida como importante para el diseño de algunos aparatos de transferencia de calor.

De los constituyentes en los gases de combustión, el dióxido de carbón y el vapor de agua son los únicos



que tienen características de radiación suficientemente fuertes para ser considerados.

Considerando ésto, la radiación desde los gases conteniendo dióxido de carbón y vapor de agua, puede ser aproximada por:

$$Q_r = 0,172 \cdot A_o \cdot \epsilon_s \left[ \epsilon_g \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - a \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 \right]$$

En la cual:

$Q_r$  = Calor por radiación a los gases.

$A_o$  = Area de calefacción. 87,8 m<sup>2</sup> (945 ft<sup>2</sup>)

$\epsilon_s$  = Emisividad del tubo. 0,8 para caldera

$\epsilon_g$  = Emisividad de los gases a la temperatura  $T_g$

$T_g$  = Temperatura absoluta del gas, °R

$a$  = Emisividad de los gases a la temperatura  $T_s$

$T_s$  = Temperatura absoluta de la superficie del tubo, °R

Cuando los gases están a presión atmosférica estándar, como es el caso en casi todas las calderas, las emisividades del gas pueden ser evaluadas desde las ecuaciones:

$$\epsilon_g = \epsilon_{cg} + \epsilon_{wg} \cdot C_w$$

$$a = \epsilon_{cs} + \epsilon_{ws} \cdot C_w$$

Donde:

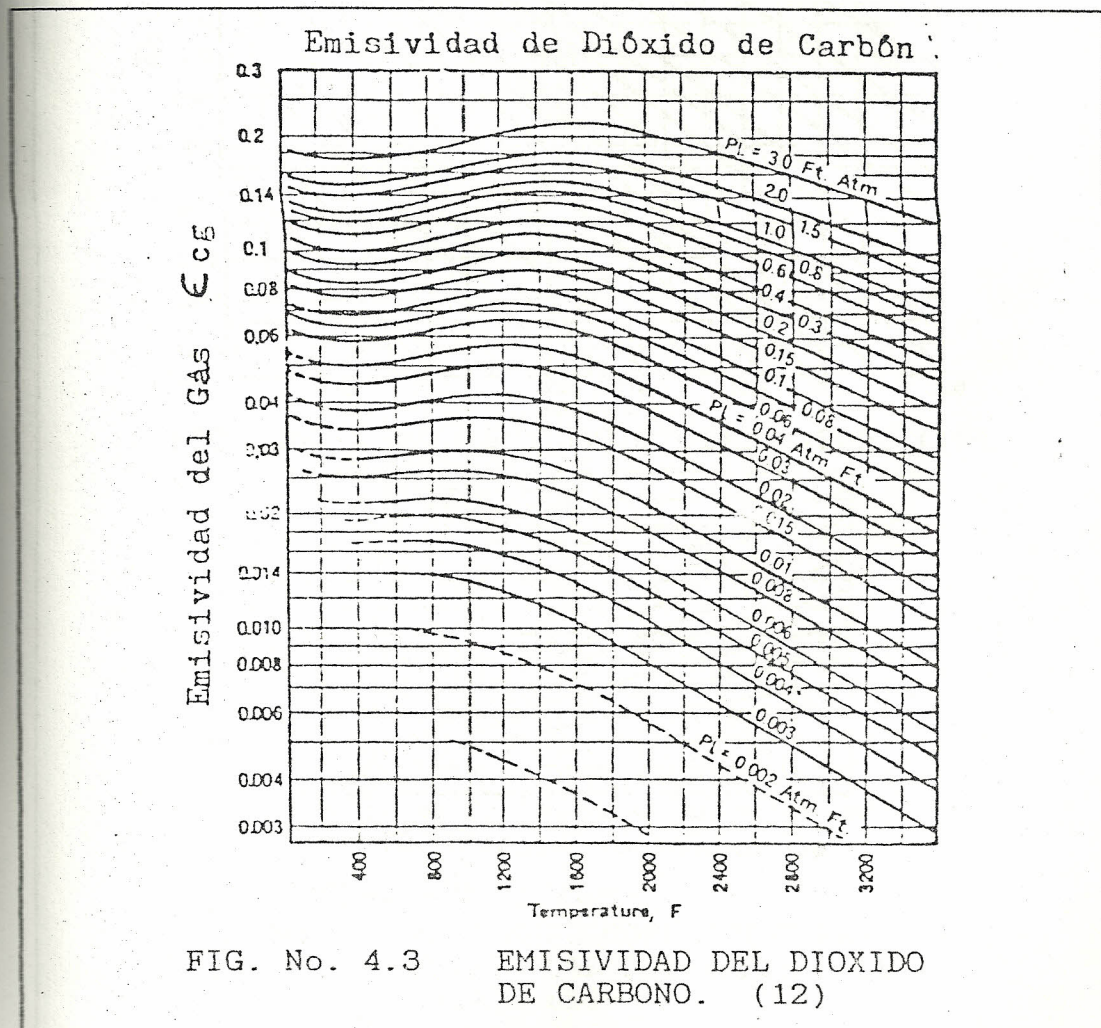
$\epsilon_{cg}$  = Emisividad del dióxido de carbón a temperatura  $T_g$  desde la Fig. No. 4.3

$\epsilon_{wg}$  = Emisividad del vapor de agua a temperatura  $T_g$  desde la Fig. No. 4.4

$\epsilon_{cs}$  = Emisividad del dióxido de carbón a temperatura  $T_s$  desde la Fig. No. 4.3

$\epsilon_{ws}$  = Emisividad del vapor de a agua temperatura  $T_s$  desde la Fig. No. 4.4

$C_w$  = Factor de corrección del vapor de agua desde la Fig. No. 4.5



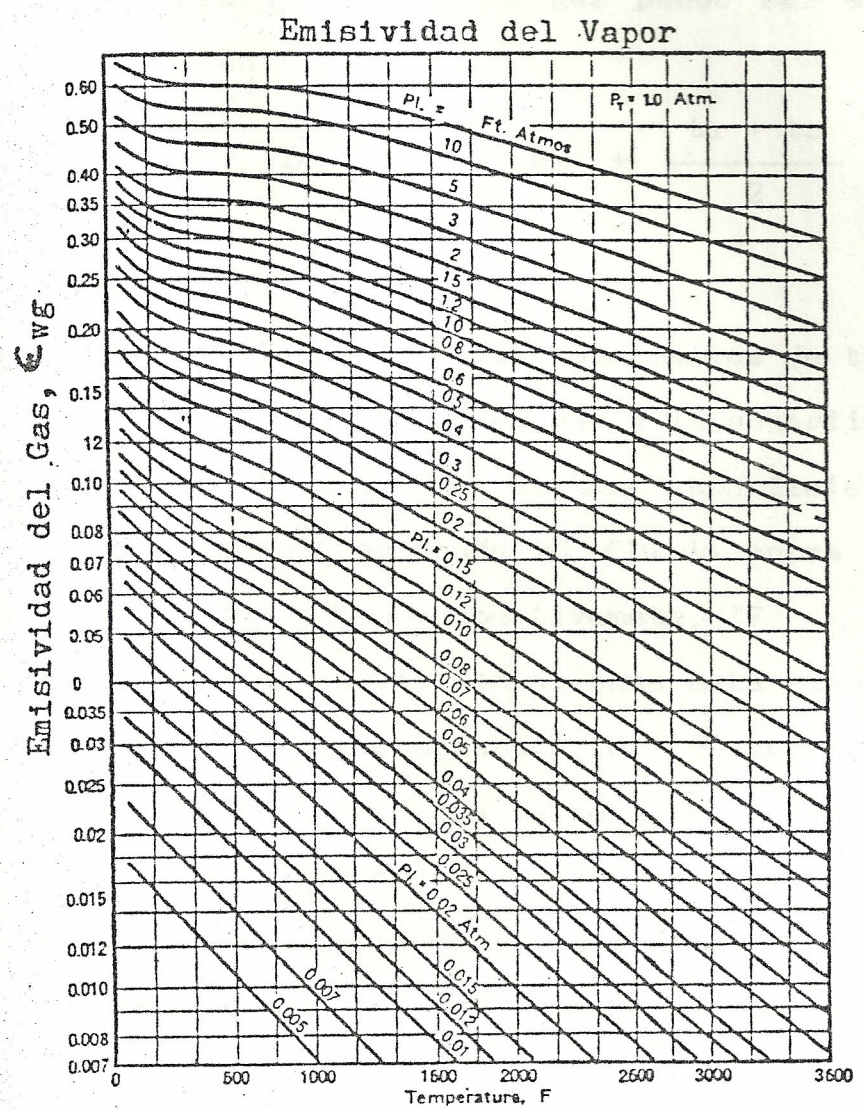


FIG. No. 4.4 EMISIVIDAD DEL VAPOR. (12)

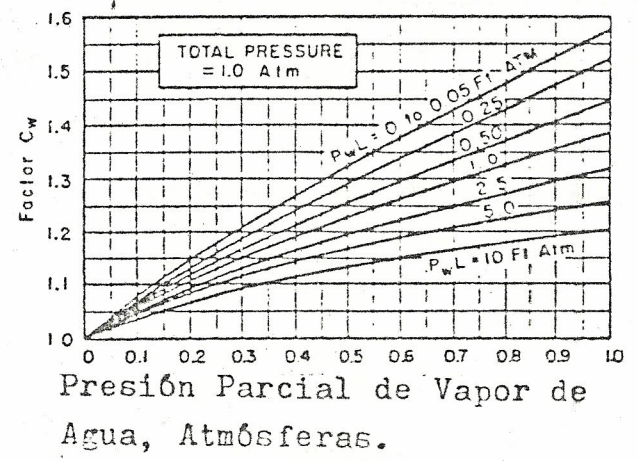


FIG. No. FACTOR DE CORRECCION PARA EMISIVIDAD DEL VAPOR DE AGUA. (12)

La temperatura media del gas puede ser estimada de la ecuación:

$$T_g = 460 + \theta_m + \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Donde:

$\theta_m$  = Diferencia media logarítmica de temperatura (MLTD), entre el gas y la superficie, °F  
 $t_1$  y  $t_2$  = Temperaturas de las superficies para las secciones donde el fluido entra y sale de los tubos respectivamente, °F

En la zona de convección el agua está siendo evaporada y por eso la temperatura de la superficie del tubo es constante en toda la zona ( $t_1 = t_2$ ). Esto también es suficientemente exacto para decir que la temperatura de la superficie del tubo es la misma que la temperatura del agua y vapor dentro de los tubos.

La temperatura de la superficie del tubo para nuestro caso es de 198°C (388°F), y la temperatura media del gas será:

$$T_g = 460 + 935 + 388 = 1783 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\text{ó } t_g = 1323 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_s = T_w$$

Donde  $T_w$  es la temperatura de la pared del tubo que será determinada más adelante. Para cálculos previos

como se consideró anteriormente, se utiliza como  $T_s$  el valor correspondiente a la temperatura del vapor, o sea  $T_s = 848 \text{ }^\circ\text{R}$  ó  $t_s = 388 \text{ }^\circ\text{F}$ .

Observe que los valores de  $\epsilon_c$  y  $\epsilon_w$  mostrados en las figuras 4.3 y 4.4 están graficados con valores de PL como parámetros. Para cada curva, P es la presión parcial del gas expresado en atmósferas y L es la longitud del haz radiante para el gas expresado en piés. Los subíndices c y w indican dióxido de carbón y vapor de agua, respectivamente. Los valores de L pueden ser determinados desde las expresiones dadas en la Tabla VI.

Los parámetros de PL son también usados en la figura No. 4.5. Este gráfico considera el efecto de la presión parcial del vapor de agua sobre la radiación

Las presiones parciales de los gases son proporcionales al análisis volumétrico de los gases húmedos. Para nuestro caso se tiene 9,74 %  $\text{CO}_2$  y 16 % de vapor de agua. Por eso evaluando L desde la tabla VI como  $3/12 \times 2,8$  entonces, se tiene:

$$P_c L = 0,974 \times 3/12 \times 2,8 = 0,682$$

$$P_w L = 0,16 \times 3/12 \times 2,8 = 0,112$$

$$C_w = 1,12 \quad (\text{Desde la Fig. 4.5})$$

TABLA VI  
LONGITUDES PROMEDIO DE HACES RADIANTES EN VARIAS  
FORMAS GASEOSAS

F O R M A	L, ft
1. Esfera	2/3 x diámetro
2. Cilíndro infinito	1 x diámetro
3. Espacio entre planos paralelos infinitos	1,8 x distancia entre planos
4. Cubo	2/3 x lado
5. Espacio fuera de un banco infinito de tubos, cuyos centros forman triángulos equiláteros; diámetro del tubo igual al claro entre tubos	2,8 x claro
6. Igual a (5) excepto que el diámetro del tubo es igual a la mitad del claro.	3,8 x claro

Fuente: Referencia (14)

Evaluando las ecuaciones de  $\epsilon_g$  y  $a$  para  $T_g$  y  $T_s$  :

$$\epsilon_g = 0,14 + 0,065 \times 1,12 = 0,2128$$

$$a = 0,117 + 0,105 \times 1,12 = 0,2346$$

Reemplazando en la ecuación para  $Q_r$  se tiene:

$$Q_r = 0,1723 (945 \times 0,8) \left[ 0,2128 (17,83)^4 - 0,2346 (8,48)^4 \right]$$

$$= 666.146 \text{ Kcal/hr} \quad (2.643.435 \text{ BTU/hr})$$

Entonces, la energía total transferida para toda la caldera es:

$$\begin{aligned} Q &= Q_c + Q_r \\ &= 826.072 + 666.146 \\ &= 1.492.218 \text{ Kcal/hr} \end{aligned}$$

La evaporación producida es

$$\begin{aligned} W' &= Q / h_{fg} \\ &= \frac{1.492.218}{666,28 - 30} \\ &= 2345,2 \text{ Kg/hr} \end{aligned}$$

Como la producción bruta de la caldera requerida para nuestro propósito es de 2000 Kg. de vapor por hora y la obtenida se de 2345 Kg.vapor/hr, nos hace ver que la eficiencia asumida de 60% no es correcta; por lo tanto, otra prueba deberá hacerse. Cálculos iterativos demuestran que con una eficiencia de 66 % obtenemos los siguientes valores:

$$\begin{aligned} W &= 2.000 \text{ Kg vapor/hr} \\ Q_v &= 1.272.560 \text{ Kcal/hr} \\ W_f &= 780 \text{ Kg/hr} \\ W_h &= 5285 \text{ Kg humos / hr} \\ A_p &= 4,33 \text{ m}^2 \\ V_h &= 6,95 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dimensiones de la cámara:

Ancho : 2,4 m

Profundidad : 1,81 m

Altura : 1,60 m

Número de hileras de tubos de profundidad = 10

Area de flujo :  $A_f = 1,44 \text{ m}^2$

$T_e = 1047 \text{ }^\circ\text{C}$

$N = 50 \text{ Tubos}$

$T_{es} = 216 \text{ }^\circ\text{C}$

$\theta_m = 437 \text{ }^\circ\text{C}$

$A_o = 87,8 \text{ m}^2$

$U_o = 18,73 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

$Q_c = 750.000 \text{ Kcal/hr}$

$\epsilon_g = 0,2162$

$a = 0,1765$

$Q_r = 516.000 \text{ Kcal/hr}$

Por lo tanto:

$Q = 1.266.600 \text{ Kcal/hr}$

Con  $h_{fg} = 666,28 - 30 = 636,28 \text{ Kcal/Kg}$

Tenemos:  $W' = 1990 \text{ Kg vapor/hr}$

Lo que comparandola con  $W = 2000 \text{ Kg vapor/hr}$ , se demuestra que la eficiencia asumida de 66% es correcta

Por lo tanto:  $\eta = 66 \%$



#### 4.13 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DEL TUBO

Antes de hallar la temperatura de la pared del tubo, se realiza un cálculo precedente para encontrar el coeficiente de convección de película del fluido circulando en los tubos.

##### a). Coeficiente de película. Lado-Agua

Los coeficientes de transferencia de calor para el agua para flujo turbulento, en el interior de los tubos o tuberías son tomadas desde las figuras No. 4.6 y 4.7 y con la relación:

$$h_1 = (h) (F_d) (F_t)$$

Donde:

$h_1$  = Coeficiente de película del lado líquido  
Kcal/hr.m<sup>2</sup>.°C

$h_0$  = Valor base desde la Fig. No. 4.6

$F_d$  = Factor de corrección del diámetro, desde  
Fig. No. 4.7

$F_t$  = Factor de corrección para temperatura de  
Fig. No. 4.7

Entonces, de la Fig. No. 4.6 para una velocidad del agua de 1 fps y curva 2 :  $h_0 = 323$  BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F.  
Desde la Fig. No. 4.7 para  $T_{ma}$ , temperatura media del agua:

$$T_{ma} = \frac{388 + 86}{2} = 237 \text{ } ^\circ\text{F}$$

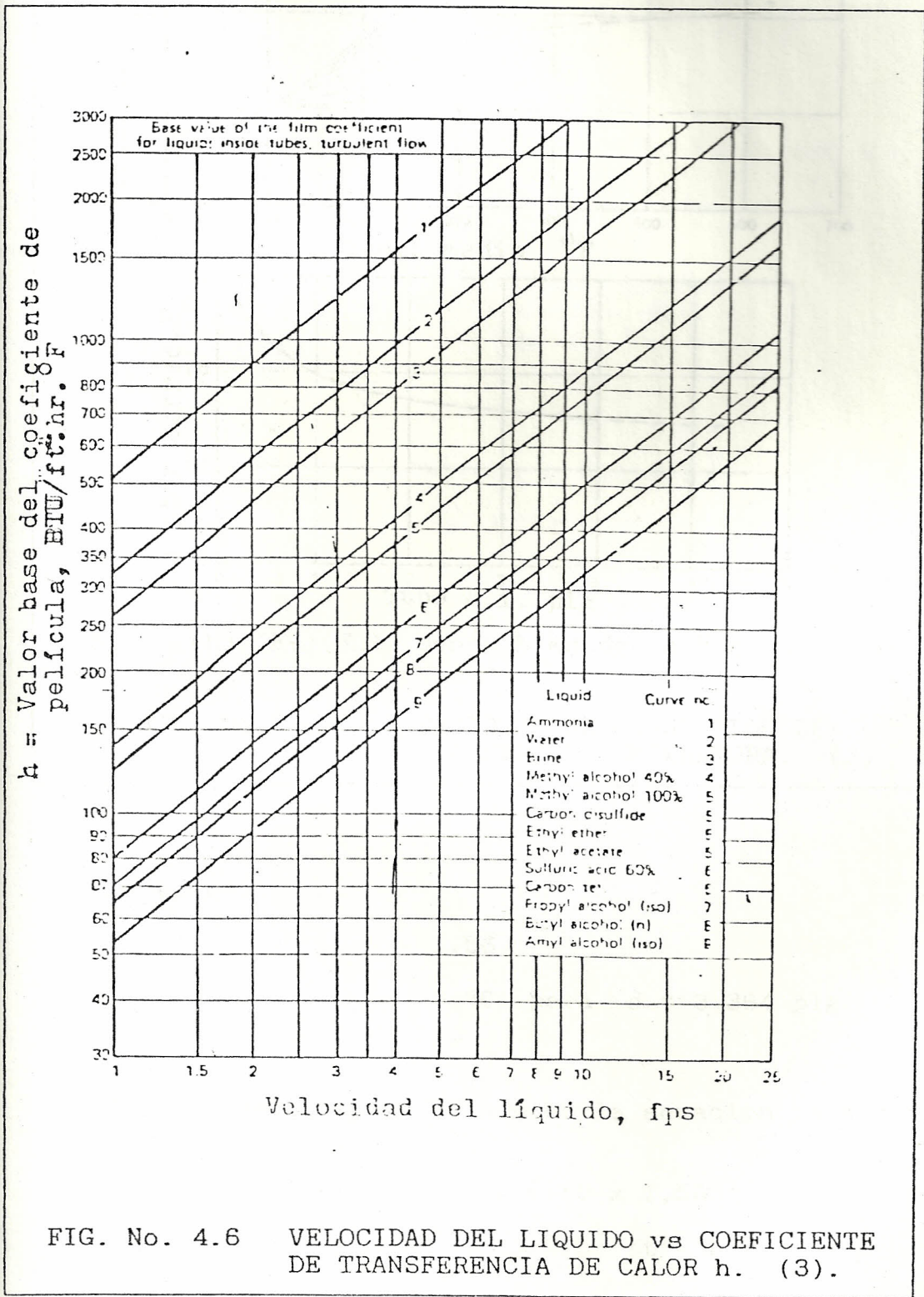
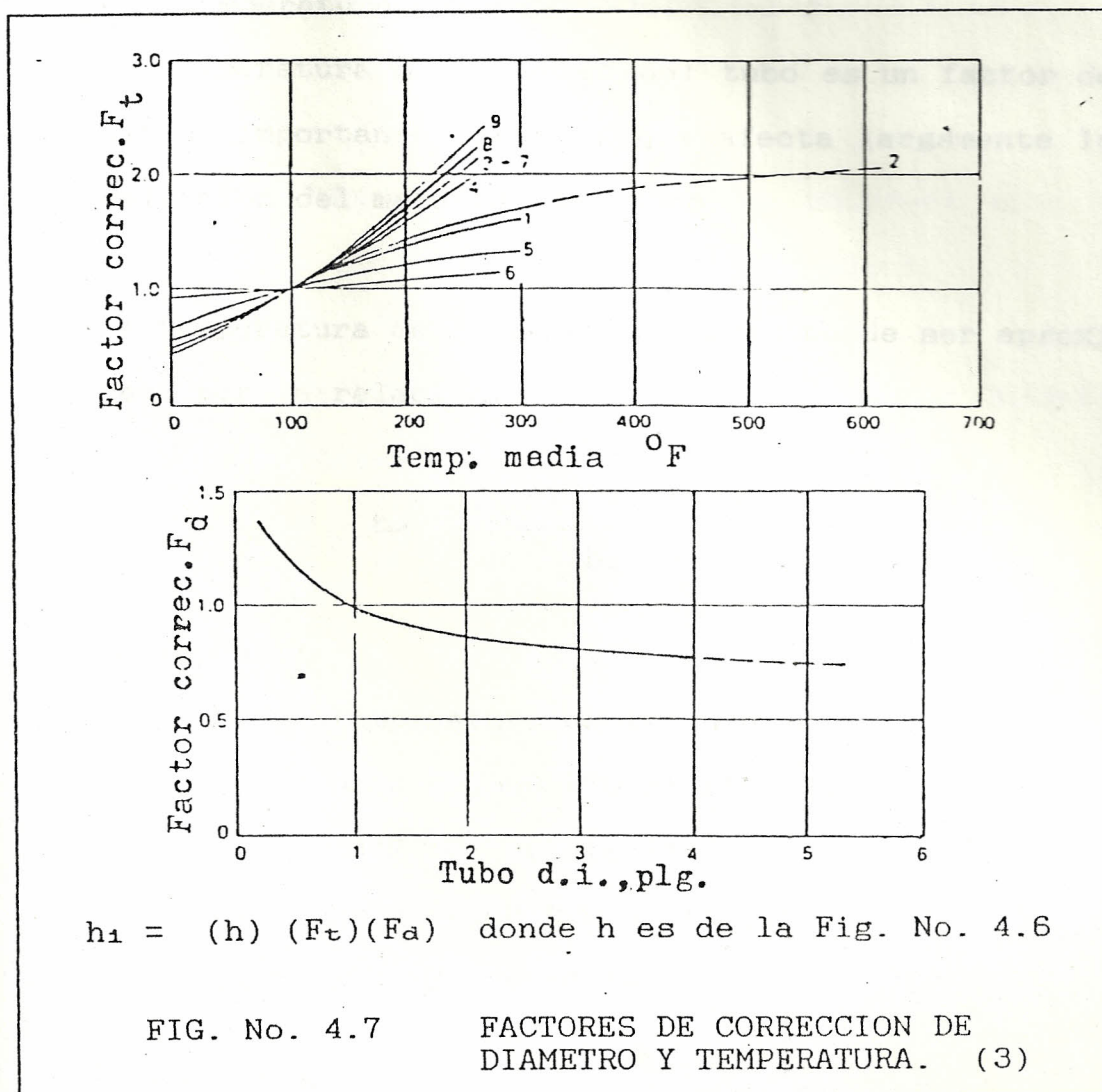


FIG. No. 4.6 VELOCIDAD DEL LIQUIDO vs COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR h. (3).



$$h_1 = (h) (F_t)(F_a) \text{ donde } h \text{ es de la Fig. No. 4.6}$$

Se tiene:

$$F_t = 1,56$$

$$F_a = 0,80 \text{ para } d = 3,364 \text{ plg.}$$

Por lo tanto, reemplazando en la ecuación para  $h_1$ :

$$\begin{aligned} h_1 &= 323 \times 0,80 \times 1,56 \\ &= (400 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

## b). Temperatura del tubo

La temperatura de la pared del tubo es un factor de diseño importante debido a que afecta largamente la selección del material del tubo.

La temperatura de la pared del tubo puede ser aproximada por la relación:

$$t_w = \frac{h_1 \cdot t_1 + h_2 \cdot t_2}{h_1 + h_2}$$

En la cual:

$t_w$  = Temperatura de la pared del tubo, °C

$h_1$  =  $U_o = (3,386 \text{ BTU/hf.ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$

$t_1$  =  $1047 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $1916 \text{ }^\circ\text{F}$ )

$h_2$  =  $h_1 = (400 \text{ BTU/hr.ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$

$t_2$  =  $198 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $388 \text{ }^\circ\text{F}$ )

Reemplazando:

$$\begin{aligned} t_w &= \frac{3,386 \times 1916 + 400 \times 388}{3,386 + 400} \\ &= 205 \text{ }^\circ\text{C} \quad (401 \text{ }^\circ\text{F}) \end{aligned}$$

En el cálculo del calor por convección se consideró un valor de  $t_w = 198 \text{ }^\circ\text{C}$  como temperatura de la pared del tubo, el cual difiere en forma insignificante del valor encontrado de  $205 \text{ }^\circ\text{C}$ ; por lo tanto, se pue

de tomar como correctos los cálculos realizados.

#### 4.14 CHIMENEA

Los parámetros principales de la chimenea son: el área de la sección transversal y su altura.

##### 4.14.1 AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA CHIMENEA

Se tiene que:

$$S_2 = W_h / \delta_g \cdot V_2$$

Donde:

$S_2$  = Area de la sección transversal de la chimenea .

$W_h$  = 5284,5 Kg humos/hr .

$\delta_g$  = 1,3 Kg/m<sup>3</sup>

$V_2$  = 10,67 m/s. (2)

Reemplazando:

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{5284,5}{1,3 \times 10,67 \times 3600} \\ &= 0,106 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Como:

$$S_2 = \pi \times D^2 / 4$$

Entonces:

$$\begin{aligned} D &= (4 \times S_2 / \pi)^{1/2} \\ &= (4 \times 0,106 / \pi)^{1/2} \\ &= 0,367 \text{ m} \quad (14,5 \text{ plg}) \end{aligned}$$

## 4.14.2 ALTURA DE LA CHIMENEA (2)

Se puede determinar de la siguiente manera:

$$H = \frac{1,2 \times P_e}{2,96 B (\delta_o/T_o - \delta_c/T_c)}$$

Siendo:

$$\delta_o = 1,2 \text{ Kg/m}^3 \quad (0,073 \text{ lb/ft}^3)$$

$$\delta_c = 0,723 \text{ Kg/m}^3 \quad (0,045 \text{ lb/ft}^3)$$

$$T_o = 86 + 460 = 546 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$T_c = 420 + 460 = 880 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$B = 30 \text{ plg Hg}$$

$$P_e = p_1 + p_2$$

Donde:

$$p_1 = 0,15 \text{ plg. c. H}_2\text{O}$$

$$p_2 = 0,05 \text{ plg. c. H}_2\text{O}$$

$$P_e = 0,15 + 0,05 = 0,20 \text{ plg. c. H}_2\text{O}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación para la altura, tenemos:

$$\begin{aligned} H &= \frac{1,2 \times 0,20}{2,96 \times 30 (0,073/546 + 0,045/880)} \\ &= 10 \text{ m} \quad (32,8 \text{ ft}) \end{aligned}$$

La altura de la chimenea es medida desde el centro de la línea de entrada de los gases al ducto.

#### 4.15 SELECCION DEL QUEMADOR

La determinación se la hará, bajo las siguientes condiciones:

1. El poder calorífico del diesel (Fuel Oil No. 2), por unidad de volumen, utilizable en la cámara es de 25040 Kcal/galón (Ref. 2.5.1 Cap II).
2. En la Tabla I existe una recomendación, de que el quemador auxiliar debe suministrar (1700 BTU/hr y por lb. de basura)
3. El rango de carga de basura es de 780 Kg (1720 lb), de los cuales el 50 % (860 lb), corresponde al peso del contenido de agua para basura TIPO 2.

Teniendo:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m} \times \dot{H}_q$$

Siendo:

$\dot{Q}_1$  = Cantidad de calor para secar la basura y comensar la ignición (BTU/hr)

$\dot{m}$  = Masa de agua = (860 lb/hr)

$\dot{H}_q$  = Calor suministrado por el quemador (1700 BTU/lb basura)

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= 860 \times 1700 = (1.462.000 \text{ BTU/hr}) \\ &= 368424 \text{ Kcal/hr} \end{aligned}$$

Si dividimos la cantidad de calor necesario, para el poder calorífico del combustible auxiliar, se obtiene la capacidad del quemador, que es:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad} &= \frac{368424 \text{ Kcal/hr}}{25040 \text{ Kcal/galón}} \\ &= 14,7 \text{ galones/hr} \end{aligned}$$

En el mercado local, existen quemadores de capacidades variables, dentro de los cuales están los de 3 a 7 galones/hr, regulables por medio de boquillas de salida de combustible. En el diseño se puede utilizar 3 quemadores de 5 gls/hr, ya que ésto cumplirá con las condiciones calculadas.

La posible ubicación de los quemadores en el hogar puede ser uno en la pared frontal y otro en la pared posterior, los que ayudarían al calentamiento, secado y auto combustión de los desechos y, finalmente el tercero podría ser colocado a la salida del hogar para realizar la post - combustión de los materiales volátiles.

#### 4.16 DIMENSIONES DEL DOMO

El domo es la pieza más costosa de una caldera, considerada individualmente.



La longitud del domo puede ser considerada igual a la longitud de la caldera; o sea, una longitud de 6,0 m. El diámetro, puede variar desde 1,07 a 1,524 m (40 a 60 plg) dependiendo de la capacidad para la cual es diseñada la caldera, como lo anota la referencia. (15).

Si consideramos que la capacidad del domo es:

$$V_D = V_v / 27$$

Siendo 27 la relación de circulación, entonces tenemos que

$$V_v = W / \gamma_g$$

Donde:

$$V_D = \text{Volumen del domo, m}^3$$

$$V_v = \text{Volumen del vapor, m}^3$$

$$W = 2000 \text{ Kg vapor}$$

$$\gamma_g = 7,53 \text{ Kg/m}^3$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} V_v &= 2000 / 7,53 \\ &= 265,6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} V_D &= 265,6 / 27 \\ &= 9,84 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Como:

$$V_D = \pi \times (D_D)^2 \times L_D / 4$$

Si por seguridad consideramos la longitud del domo ( $L_D$ ), igual a 6,0 m, el diámetro del domo será entonces:

$$D_D = \left( \frac{4 \times 9,84}{\pi \times 6,0} \right)^{1/2}$$

$$= 1,45 \text{ m (57 plg)}$$

#### 4.17 SELECCION DE MATERIALES

La selección de materiales para la construcción de calderas, está controlada por lo dispuesto en la Sec. II del Código de Calderas " ASME " (Especificaciones de materiales). Las calderas para la generación de fuerza se construyen usualmente con aceros especiales.

El metal básico para la construcción de calderas que trabajan con temperaturas aproximadas de 427°C (800 °F). es el acero al carbono; para temperaturas entre 468°C y 509°C (875 y 950°F), se utiliza acero al cromo - molibdeno (5% Cr - 0,5% Mo). Arriba de 509°C, se usa el acero inoxidable (18% Cr y 8% Ni). (3).

La Tabla VII da la temperatura máxima del metal para varios materiales de operación continua. Los esfuerzos aprovechables para la condición en cuestión debe ser tomada desde el manual de materiales o del Código ASME.

TABLA VII  
TEMPERATURA MAXIMA DEL METAL

TEMPERATURA (°C)	MATERIAL
204	Cobre
288	Bronce
370	Cobre - Niquel
400	Acero al carbono (ASME Esp. SA53)
454	Acero al carbono (ASME Esp. SA178)
480	Acero de baja aleación (ASME Esp. SA209)
538	Acero de baja aleación (ASME Esp. SA217)
788	Acero de alta aleación (ASME Esp. SA213, SA304, SA312, SA240)
816	Acero de alta aleación (19 - 9)
982	Inconel - X, aleación 25

Fuente: Referencia (3)

Valores de esfuerzos aprovechables, para los tipos más populares de tuberías de acero están listadas en la tabla D del apéndice.

Finalmente, la Tabla VIII muestra los resultados finales obtenidos en los cálculos para el diseño de la caldera acuatubular de tubos rectos de un sólo

domo longitudinal.

TABLA VIII

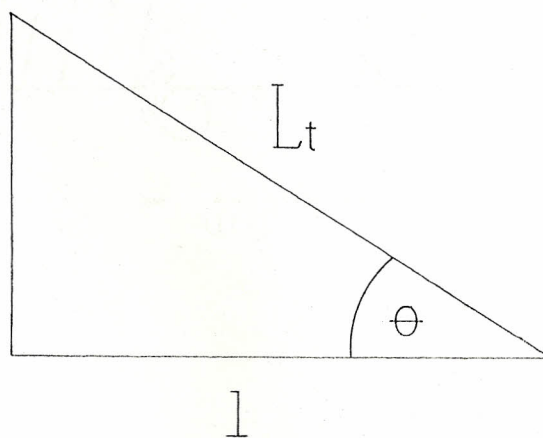
RESULTADOS FINALES DEL DISEÑO

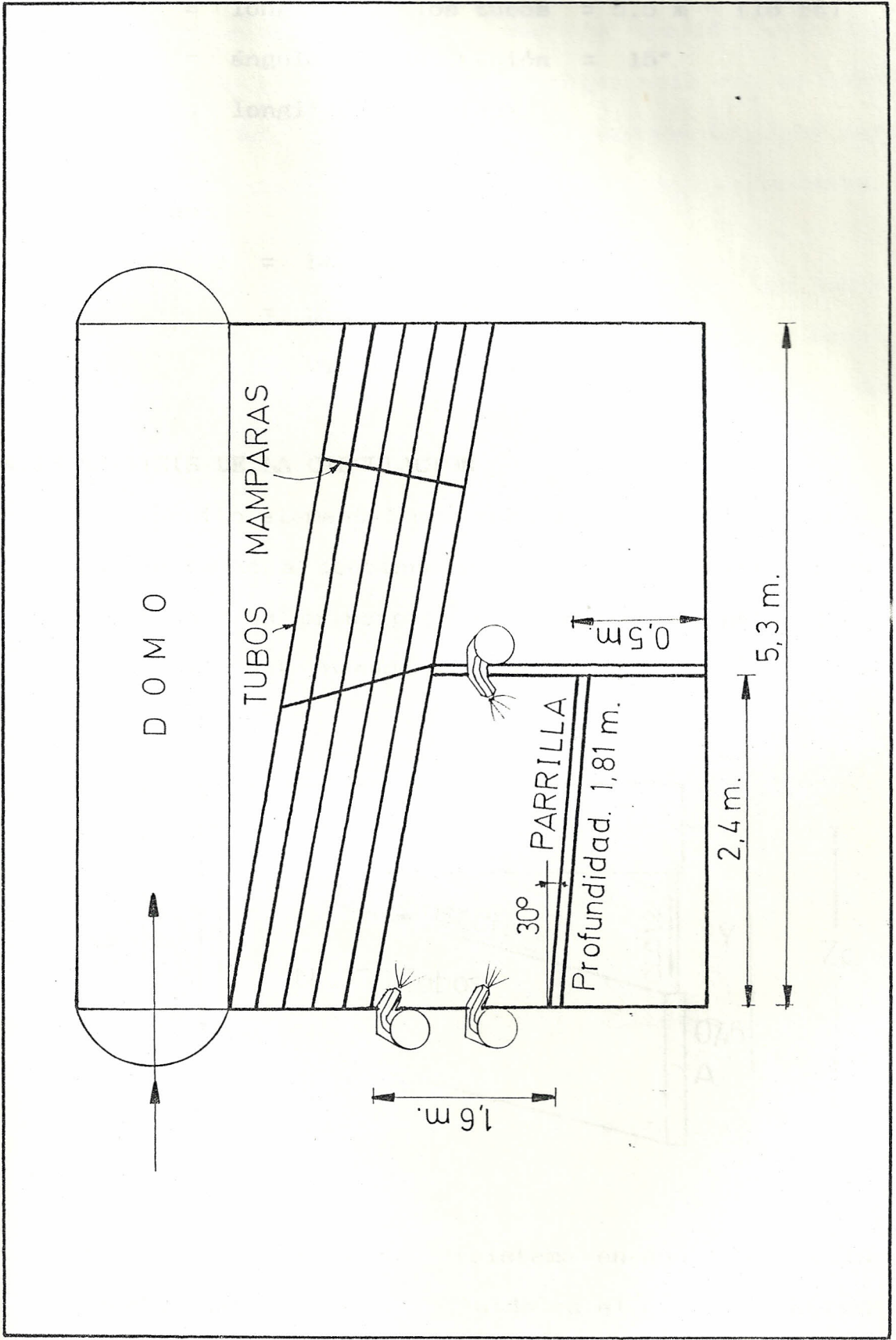
PARAMETRO	VALOR
Presión de operación	15 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del vapor saturado	198°C
Capacidad de la caldera	2000 Kgvapor/hr
Calor de vaporización	1272560 Kcal/hr
Eficiencia global de la caldera	66%
Cantidad de desecho a quemarse	780 Kg/hr
Masa de los humos	5285 Kg/hr
Area de la parrilla	4.33 m <sup>2</sup>
Volumen del hogar	6,95 m <sup>3</sup>
Dimensiones del hogar:	
Ancho	2,40 m
Profundidad	1,81 m
Altura	1,60 m
Temperatura de los gases a la salida del fogón	1047°C
Número total de tubos	50
Longitud de los tubos	6,0 m
Diámetro exterior	102 mm
Diámetro interior	85,4 mm
Inclinación	15°

PARAMETRO	VALOR
Calor por convección	750000 Kcal/hr
Calor por radiación	516000 Kcal/hr
Temperatura de la pared del tubo	205°C
Diámetro de la chimenea	36,7 cm
Altura de la chimenea	10 m
Tres quemadores de:	5 gls diesel/hr
Longitud del domo	6,0 m
Diámetro del domo	1,45 m
Material de los tubos	acero al carbono

Para una mayor comprensión, podemos para ello realizar un esquema representativo de la caldera con sus dimensiones, considerando un ángulo de inclinación de los tubos de  $15^\circ$  como se indica en el literal 2.6 del Cap. II.

Longitud proyectada de los tubos:





$L_t$  = longitud de los tubos = 5,5 m (18 ft)

$\theta$  = ángulo de inclinación =  $15^\circ$

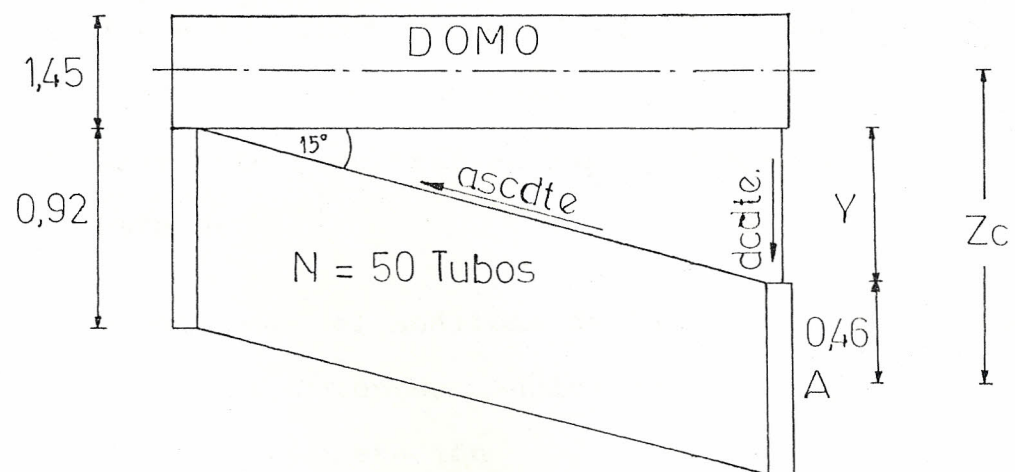
$l$  = longitud proyectada

Entonces:

$$\begin{aligned} l &= L_t \times \cos \theta \\ &= 5,5 \times \cos 15^\circ \\ &= 5,3 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 4.18 ANALISIS DE LA CIRCULACION

El circuito elemental mostrado y las relaciones básicas anotadas a continuación pueden ser usadas para demostrar los principios de circulación natural en los cuales esta basado el diseño.



Para flujo estabilizado (sistema en equilibrio), la presión neta en  $A$  del fluido en el circuito descen

dente debe ser balanceada por la presión neta del fluido en el circuito ascendente; esto es, el cabezal neto  $H_d$ , en el circuito descendente debe ser igual al cabezal neto  $H_r$ , en el circuito ascendente.

Para flujo de dos fases, como es usual en los tubos ascendentes de las calderas de vapor, una buena aproximación de las pérdidas de fricción para calidades del vapor relativamente bajas puede ser hecha como sigue:

1. Calcular el número de Reynolds, usando el fluido total (vapor + agua) y la viscosidad del agua.
2. Obtener el correspondiente factor de fricción,  $f$ , desde la Fig. No. 4.9
3. Multiplicar el  $f$  así obtenido por 1,5 para considerar las pérdidas de flujo secundario asociada con el flujo de dos fases.
4. Usar éste resultado en lugar de  $f$  en la ecuación para  $h_f$

Para realizar el análisis de la circulación se cuenta con las siguientes condiciones:

$$1. \text{ Presión de operación} = 15 \text{ Kg/cm}^2$$

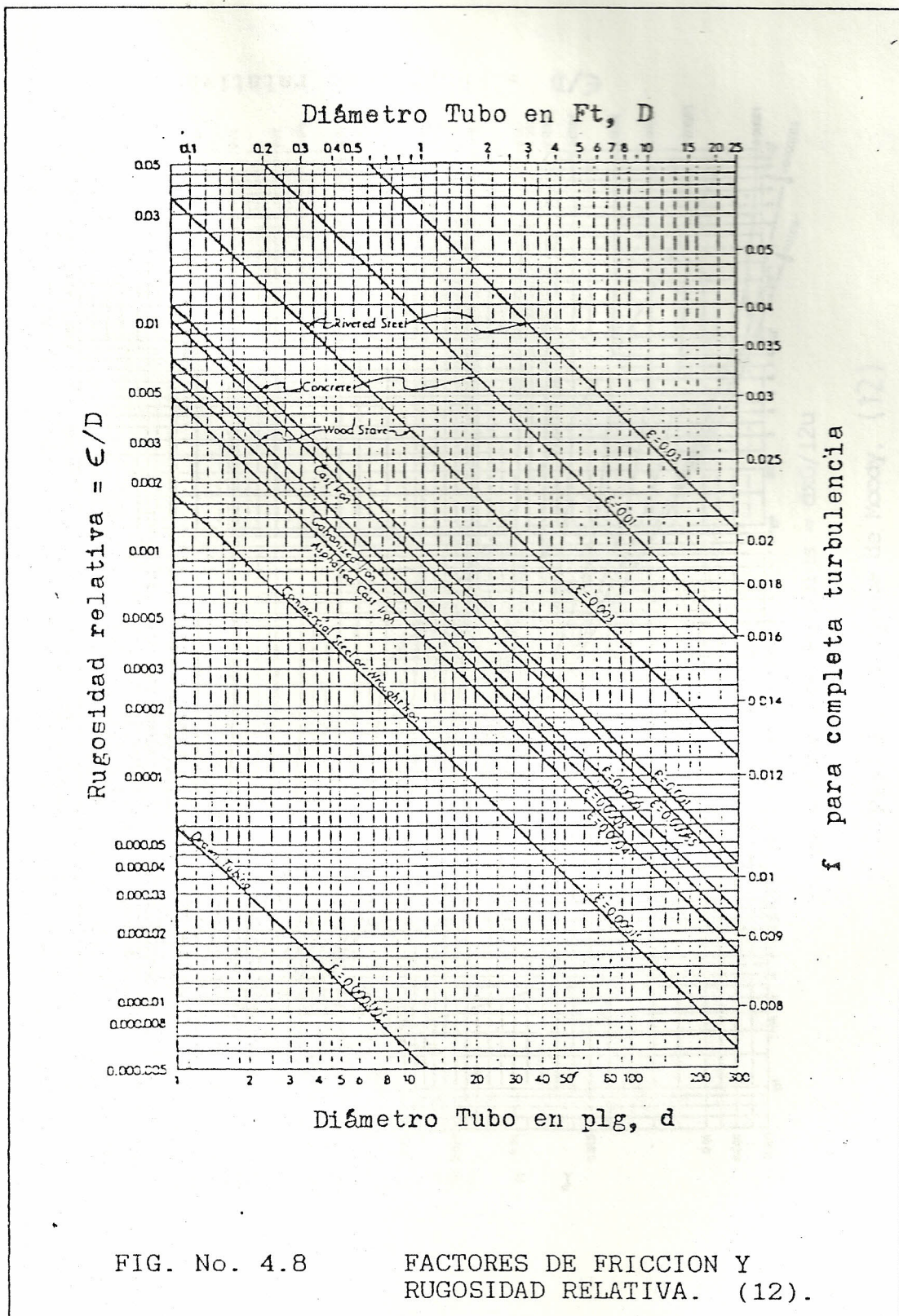
$$\text{Temperatura a 15 atm.} = 198^\circ\text{C}$$

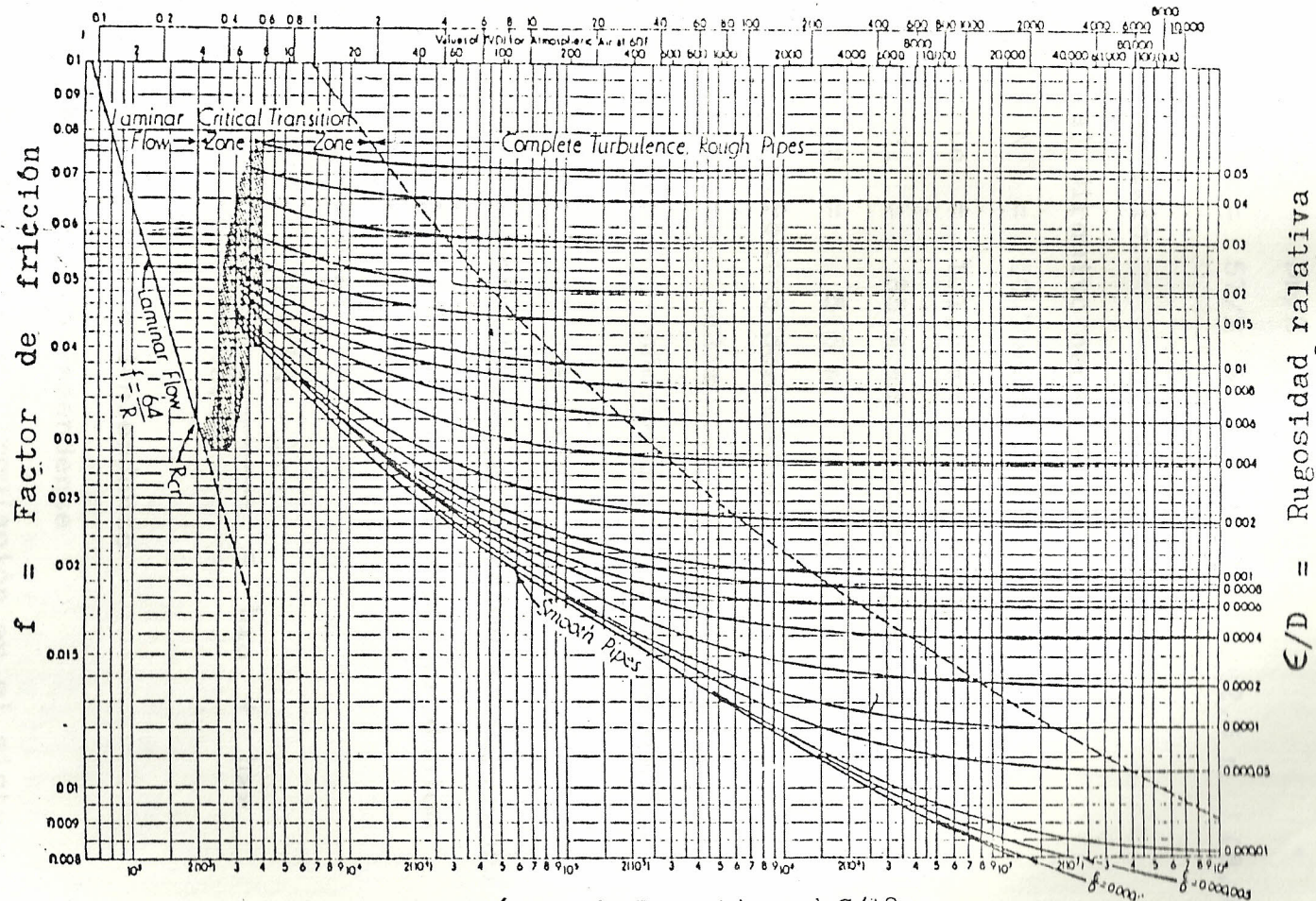
$$\gamma_f = 1/v_f = 867,4 \text{ Kg/m}^3 \quad (54,142 \text{ lb/ft}^3)$$

$$\gamma_g = 1/v_g = 7,53 \text{ Kg/m}^3 \quad (0,469 \text{ lb/ft}^3)$$

$$\gamma_{\text{mezcla}} = 165,75 \text{ Kg/m}^3 \quad (10,35 \text{ lb/ft}^3)$$







Re = Número de Reynolds =  $\frac{dxG}{12u}$

Fig. 4.9 Diagrama de Moody. (12)

## 2. Del circuito elemental:

$$Y = 5,5 \text{ sen } 15^\circ = 1,42 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} Z_c &= D_D/2 + Y + 18 \\ &= 57/2 + 56 + 18 = 2,6 \text{ m} \quad (8,542 \text{ ft}) \end{aligned}$$

## 3. Arreglo:

## a) Circuito ascendente

$$N = 50 \text{ Tubos}$$

$$D_e = 101,6 \text{ mm} \quad (4 \text{ plg})$$

$$d_i = 85,4 \text{ mm} \quad (3,364 \text{ plg})$$

$$L_r = 5,5 \text{ m} \quad (18 \text{ ft})$$

## b) Circuito descendente

$$L_d = 1,42 \text{ m} \quad (4,7 \text{ ft})$$

Diámetro y número de tubos a determinar

## 4. Flujo en el circuito

$$W = 2000 \text{ Kg vapor/hr} \quad (4409 \text{ lb vapor/hr})$$

$$R.C = 27 \text{ Kg mezcla/Kg vapor producido}$$

## 5. Ecuaciones:

$$\frac{Z_c(\gamma_d - \gamma_r)}{62,4} = h_{\Sigma d} + h_{\Sigma r}$$

d - circuito descendente

r - circuito ascendente

h - pérdidas de circulación en el sistema, ft H<sub>2</sub>O

$$h_{\Sigma d} = h_f + h_b + h_{en} + h_{ex} + h_k$$

$$h_{\Sigma r} = h_f + h_b + h_{en} + h_{ex} + h_k + h_a + h_{ac} + h_e$$

## A.- Pérdidas en el circuito ascendente

## 1. Flujo total

$$\begin{aligned} W_v &= W \times R.C \\ &= 2000 \times 27 \\ &= 54000 \text{ Kg mez/hr} \quad (120000 \text{ lb mez/hr}) \end{aligned}$$

## 2. Area de flujo

$$\begin{aligned} A_{fv} &= \pi \times d_1^2 \times N / 4 \\ &= 0,7854 (0,0854)^2 \times 50 \\ &= 0,286 \text{ m}^2 \quad (3,1 \text{ ft}^2) \end{aligned}$$

## 3. Flujo másico

$$\begin{aligned} G &= W_v / A_{fv} \\ &= 54000 / 0,386 \\ &= 190000 \text{ Kg/hr.m}^2 \quad (38613 \text{ lb/hr ft}^2) \end{aligned}$$

## 4. Viscosidad absoluta del agua saturada. (13)

$$\mu = 0,48 \text{ Kgm/hr.m} \quad (0,322 \text{ lbm/hr.ft}) \quad \text{a } 198^\circ\text{C}$$

## 5. Número de Reynolds

$$Re = \frac{G \times d_1}{12 \times \mu} = \frac{38613 \times 3,364}{12 \times 0,322} = 33600$$

## 6. Para acero comercial

$$\epsilon/d_1 = 0,00053 \quad (\text{Fig. No. 4.8})$$

$$\text{con } Re = 33600 \quad f = 0,024 \quad (\text{Fig. No. 4.9})$$

## 7. Pérdidas por fricción

$$h_f = \frac{2,31 \times f \times L_r (G \times 10^{-5})^2}{d_1 \times \gamma_r}$$

$$\gamma_r = \frac{2}{(1/\gamma_f) + (1/\gamma_{mez})}$$

$$= \frac{2 \times 10^{-5}}{(1/867,4) + (1/165,75)}$$

$$= 238,32 \text{ Kg/m}^3 \quad (17,4 \text{ lb/ft}^3)$$

$$h_f = \frac{2,31 \times 1,5 \times 0,024 \times 18 \times (0,386)^2}{3,354 \times 17,4}$$

$$= 0,00382 \text{ ft H}_2\text{O}$$

8. Pérdidas por curvaturas

$$h_b = 0 \quad (\text{No hay tubos curvos})$$

9. Pérdidas de entrada, de salida y por cambios de sección

$$h_{en}, h_{ex}, h_k = N_{ek} (G \times 10^{-5})^2 / 5,2 \times \gamma$$

$N_{ek}$  = pérdidas de cabezales de velocidad en la entrada ( $N_{en}$ ), salida ( $N_{ex}$ ), y cambios de sección ( $N_k$ ); 0,5 y 1,0 son comúnmente usados para  $N_{en}$  y  $N_{ex}$ , respectivamente.

$$h_{en} = \frac{0,5 \times (0,386)^2}{5,2 \times 54,142} = 0,000265 \text{ ft H}_2\text{O}$$

$$h_{ex} = \frac{1,0 \times (0,386)^2}{5,2 \times 10,35} = 0,00277 \text{ ft H}_2\text{O}$$

$$h_k = 0 \quad (\text{No hay cambios de sección en los tubos})$$

10. Pérdidas por separación del vapor

$$h_s = 1,10 \text{ ft H}_2\text{O} \quad (\text{Valor asumido})$$

11. Pérdidas por aceleración

$$\begin{aligned}
 h_{ac} &= \left( \frac{1}{\gamma_2} - \frac{1}{\gamma_1} \right) \frac{(G \times 10^{-5})^2}{2,6} \\
 &= \left( \frac{1}{10,35} - \frac{1}{54,14} \right) \frac{(0,386)^2}{2,6} \\
 &= 0,00448 \text{ ft H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

12. Pérdidas por gravedad

$$\begin{aligned}
 h_g &= 0,016 \times \gamma_r \times \frac{g}{g_c} \times L_r \times 18 \cdot \text{sen } 15^\circ \\
 &= 1,3 \text{ ft H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

13. Pérdidas en el circuito ascendente

$$\begin{aligned}
 h_{\Sigma r} &= 0,00382 + 0 + 0,000265 + 0,00277 + 0 \\
 &\quad + 1,10 + 0,00448 + 1,3 \\
 &= 2,411 \text{ ft H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\frac{8,542 (54,14 - 17,4)}{62,4} = h_{\Sigma a} + 2,411$$

$$\begin{aligned}
 h_{\Sigma a} &= 5,03 - 2,411 \\
 &= 2,618 \text{ ft H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

B.- Pérdidas en el circuito descendente

Para efectuar un balance en el circuito total, el área de flujo del circuito descendente debe seleccionarse de tal forma que:

$$h_{\Sigma a} = 2,618 \text{ ft H}_2\text{O}$$

El tamaño de los tubos se selecciona por el método de prueba y error. Pruebas preliminares se han omitido, dando finalmente:

1. Elegir: Tubos cedula 80, diámetro nominal 1 ½"

$$d_1 = 38,1 \text{ mm} \quad (1,5 \text{ plg})$$

$$N_d = 6 \text{ tubos}$$

$$L_d = 1,42 \text{ m} \quad (4,7 \text{ plg})$$

2. Area de flujo

$$A_{fd} = \pi \times d_1^2 \times N_d / 4$$

$$= 0,7854 (0,0381)^2 \times 6$$

$$= 0,00684 \text{ m}^2 \quad (0,0736 \text{ ft}^2)$$

3. Flujo másico

$$G_d = W_v / A_{fd}$$

$$= 54000 / 0,00684$$

$$= 8.000.000 \text{ Kg/hr.m}^2 \quad (1.630.000 \text{ lb/hr.ft}^2)$$

4. Viscosidad absoluta del agua saturada

$$\mu = 0,48 \text{ Kgm/hr.m} \quad (0,322 \text{ lbm/hr.ft}) \text{ a } 198^\circ\text{C}$$

5. Número de Reynolds

$$Re = \frac{1.630.000 \times 1,5}{12 \times 0,322} = 633.000$$

6. Para acero comercial

$$\epsilon/d_1 = 0,0012$$

$$Re = 633.000 \quad f = 0,0208 \quad (\text{Fig. No. 4.9})$$

7. Pérdidas por fricción

$$h_f = \frac{2,31 \times 0,0208 \times 4,7 (16,3)^2}{1,5 \times 54,14}$$

$$= 0,74 \text{ ft H}_2\text{O}$$

## 8. Pérdidas por curvaturas

$$h_b = 0 \text{ (No hay tubos curvos)}$$

## 9. Pérdidas de entrada, salida y por cambios de sección.

$$h_{en} + h_{ex} = \frac{1,5 (16,3)^2}{5,2 \times 54,14}$$

$$= 1,42 \text{ ft H}_2\text{O}$$

$$h_k = 0 \text{ (No hay cambios de sección)}$$

## 10. Pérdidas en el circuito

$$h_{\Sigma a} = 0,74 + 0 + 1,42 + 0$$

$$= 2,16 \text{ ft H}_2\text{O}$$

La suma de las pérdidas calculadas en el circuito descendente no deben exceder a las pérdidas como se derivó por la ecuación, por lo que el valor encontrado por los cálculos es aceptable, produciéndose o asegurando la circulación.



## CAPITULO V

### LOCALIZACION DEL PROYECTO

La localización más adecuada de éste tipo de proyecto debe estar orientada hacia la obtención del máximo beneficio, para lo cual debe buscarse el menor costo de instalación y montaje de manera que resulte provechoso su implementación.

Generalmente se construye en el taller todo lo más que sea posible de la caldera, ya que éste tipo de instalación es muy propia para lugares donde se tiene que seguir una técnica sencilla de montaje; sin embargo, el montaje en la obra debe evitarse hasta donde sea posible, debido a los obstáculos inherentes al mismo, tales como (1) formación más imperfecta, elementos inferiores para el tratamiento térmico y otros trabajos; (2) protección inadecuada contra la lluvia y contra temperaturas bajas; (3) la necesidad de confiar en la mano de obra local, por lo general menos experta que los obreros calificados del taller; (4) la aplicación forzosa de prácticas relativamente ineficientes, tales como la soldadura vertical o solda

dura sobre cabeza; (5) aumento de los costos de reparación por errores en la colocación y conexiones de la tubería; y (6) las necesidades de supervisión e inspección se duplican. Estas condiciones, propias de las obras, multiplican, tanto el tiempo de instalación como su costo.

Con excepción de las unidades de interperie y semiinterperie, la caldera se instala en un cuarto de calderas. Este local debe tener la amplitud suficiente para dar cupo a las calderas y sus equipos auxiliares tales como tuberías válvulas y otros accesorios.

El cuarto de calderas debe ser de una construcción tal que facilite el acceso a todas las unidades para su manejo, operación, mantenimiento e inspección.

El cuarto de calderas debe ser diseñado para el alojamiento de la caldera y el equipo de manejo del combustible y cenizas, así como otros aparatos conexos.

#### **Cimentaciones de calderas**

La caldera debe descansar sobre una base firme y adecuada para evitar asentamientos con sus consiguientes consecuencias de tubos deformados, soportes cuarteados u otros defectos similares, que redundan en el aumento de las dificultades de operación.

### Soportes de las calderas

En el diseño de las calderas acuatubulares, debèn tenerse en cuenta los siguientes puntos:

1. Los tubos deben colocarse de tal manera que los esfuerzos del momento de flexión ocasionado por el peso de los mismos tubos, el de los domos, así como el contenido de agua, queden reducidos al mínimo posible; en las unidades soportadas en la parte inferior, los tubos deben llenar los requisitos de una columna y calcularse como tal.
2. No debe excederse la capacidad de carga de los asientos de los tubos.
3. Debe permitirse la expansión de una manera controlada, sin que ocasione esfuerzos excesivos.

Generalmente el domo superior sobresale de la construcción, mientras que el domo colector de lodos, más corto, queda comprendido dentro del ancho de los muros de montaje. El domo superior se soporta de apoyos de hierro colado, por escuadras unidas a manera de brida, o se monta sobre una vigueta transversal; puede montarse también colgándolo de barras en forma de " U " por los extremos, o suspenderlo de orejas soldadas al cuerpo del domo.

Un ensamble cuidadoso y correcto de los elementos de la caldera en la obra, es algo esencial para el éxito de la instalación. Todos los trabajos de construcción, montaje e inspección, tienen que ejecutarse cuidadosamente para asegurar los mejores resultados de operación a la eficiencia mayor obtenible. Esta regla debe ser aplicada a todos los elementos de que consta la instalación: Superficies de calefacción de la caldera; fogón (dotado de paredes de agua, que puede ser o no de construcción integral); tubería de interconexión y válvulas; el equipo de manejo de combustible y el que se emplea para quemarlo; ventiladores, ductos de gases calientes y de aire; aparatos de medición y control; bases, aislamiento y cajas de recubrimiento; cimentaciones, pozo de cenizas; dispositivos de acceso; sopladores para hollín; y el edificio o cuarto de calderas en el que debe quedar instalado el equipo.

El procedimiento normal aplicado, es terminar todas las partes componentes, dándoles su forma y dimensiones definitivas, incluyendo el ranurado requerido para los cordones de soldadura. Los domos son terminados y probados; se da la forma definitiva a la tubería; y se desarrollan otros trabajos, siguiendo los lineamientos técnicos de la fábrica. Las superficies terminadas son engrasadas y protegidas contra deterioros accidentales.

**Domos y Cabezales.** Los domos grandes de las calderas

usualmente se montan primero. Una vez colocados en su lugar, se nivelan y se alinean con precisión, de acuerdo con la posición de la base (líneas de referencia), hecho lo cual se les sujeta firmemente o se les fija mediante tirantes, para impedir su movimiento durante la colocación de los tubos.

Inmediatamente después se montan los cabezales de las paredes de agua del fogón, los cabezales del supercalentador y los del economizador, en caso de existir. Todos ellos se alinean conforme a la posición del domo de vapor, para eliminar la acumulación de errores de dimensión.

**Tubos.** Los tubos se van montando en el orden requerido. Inicialmente se les presenta en su lugar y se fijan provisionalmente mediante expansión o abocinado de los extremos proyectados. Una vez colocados todos los tubos, se procede a su alineamiento.

**Equipos para quemar el combustible.** Cada combustible requiere consideraciones especiales para (1) su almacenamiento, (2) su conducción hacia la caldera, (3) su preparación y (4) el equipo para quemarlo.

El combustible puede ser alimentado a la caldera (1) ma

nualmente, (2) por transportadores de gusano o (3) por gravedad, de un almacén superior, por medio de un ducto vertedor. Puede ser necesaria la trituración o la pulverización del combustible antes de quemarlo.

Para sostener el proceso de la combustión, es necesario el suministro continuo de aire, así como la evacuación de los gases de combustión en la misma forma. Esto se efectúa frecuentemente utilizando el tiro que provocan los gases de la combustión por el efecto de la chimenea. En la práctica moderna se ha impuesto la instalación de ventiladores para proporcionar un tiro positivo, complementando cualquier clase de tiro natural disponible.

**Ventiladores de tiro.** Una caldera puede estar equipada con un ventilador de tiro forzado, uno de tiro inducido, o con los dos, para proporcionar una circulación positivamente controlable del aire para la combustión y de los gases producidos por ésta.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de la caldera propuesta en éste trabajo constituye una alternativa importante por las siguientes razones:

1. Soluciona uno de los problemas que tiene actualmente la humanidad, que es el de la contaminación ambiental por causa de la basura, ya que ésta es utilizada como combustible en la caldera.
2. Los desechos sólidos municipales constituyen una fuente aprovechable de energía térmica, sobre todo por estar compuestos de muchos materiales combustibles diferentes.
3. La combustión de los desechos sólidos municipales es una reacción química a alta temperatura generando calor el cual debe ser dado para un propósito útil.
4. Incentivar el aprovechamiento de la energía térmica de los diferentes recursos existentes en el País para un uso práctico y útil.
5. Aliviar los problemas existentes de electrificación por un método diferente, como es en éste caso el de u

- na central térmica, a los convencionales en zonas de escasez de energía eléctrica.
6. Da la oportunidad de conocer la tecnología y materiales existentes en nuestro País, los cuales son factores determinantes en el diseño y construcción.
  7. Es importante manipular los procesos de combustión para una máxima liberación de calor, máxima reducción de volumen y de masa de los materiales a ser incinerados y la mínima formación de emisiones indeseables.
  8. La cantidad de exceso de aire influencia no solamente la temperatura de la flama y la eficiencia térmica, si no también las emisiones orgánicas a la atmósfera.
  9. Altos niveles de exceso de aire incrementan la velocidad del flujo de humos a través del hogar, disminuyendo el tiempo de residencia de los combustibles en el hogar y por ende disminuyendo la totalidad de la combustión.
  10. En la evaluación del comportamiento del generador de vapor para un conjunto de condiciones dadas, algunos de los factores se determinan a partir de relaciones empíricas o ecuaciones aproximadas que determinan tanto la transferencia de calor como el comportamiento hidráulico de la caldera.
  11. Debe tenerse en cuenta, sobre todo cuando se manejan correlaciones empíricas; que cuando una cámara de combustión se diseña apropiadamente, el comportamiento



to térmico del equipo será muy **aproximado** al indicado por tales correlaciones.

12. Además es importante revisar la disposición de la distribución de las superficies de intercambio térmico, considerando primeramente la interrelación entre la pérdida de temperatura de los gases de combustión, la cantidad de superficie de intercambio requerida y la pérdida de tiro de los gases de combustión.

#### RECOMENDACIONES

Es aconsejable que en su construcción se utilice materia les existentes en el País para disminuir su inversión.

La selección de un emplazamiento lleva consigo problemas de ingeniería como de aceptación pública en si situación, por lo que las consideraciones para la ubicación, deben incluir la facilidad de su construcción y funcionamiento sin crear molestias al medio. Para ello se dan las siguientes recomendaciones:

FACTOR	CRITERIO DE DISEÑO	COMENTARIO
Evitar molestias	-----	La dirección del viento y la distancia a otros edificios afectan con el olor, cenizas volantes y hollín.

FACTOR	CRITERIO DE DISEÑO	COMENTARIO
Facilidad de almacenamiento	Requirimientos para recipientes de residuos y cenizas.	-----
Elevación	-----	La elevación con respecto a áreas circundantes afectan la presión barométrica y el alineamiento de la chimenea.

Es necesario que en la Facultad de Ingeniería Mecánica se continúe con los estudios de investigación sobre procesos de eliminación de desperdicios con aprovechamiento de energía; ya que conforme crece la población, se incrementa la producción de desechos sólidos.

ON 1578 COM...  
100...

	100...	100...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...

A P E N D I C E

TABLA A ANALISIS COMPUESTO DE LOS COMPONENTES BASICOS DE LOS DESECHOS  
SOLIDOS MUNICIPALES (5)

MATERIAL DESECHO	Analisis, % Peso								Btu/lb
	C	H	N	O	Cl	S	H <sub>2</sub> O	Cenizas (%) Inertes	
Carbon	36.79	5.08	0.11	35.41	0.12	0.23	20	2.26	6233
Periodico	36.62	4.66	0.11	31.76	0.11	0.17	25	1.55	6223
Revistas	32.93	4.64	0.11	32.85	0.13	0.21	16	13.13	5446
Otros papeles	32.41	4.51	0.31	29.91	0.61	0.17	23	9.06	5481
Plasticos	56.43	7.79	0.85	8.05	3.00	0.29	15	8.59	11586
Caucho, cuero	43.09	5.37	1.34	11.57	4.97	1.17	10	22.45	8433
Madera	41.20	5.03	0.24	34.55	0.09	0.07	16	2.82	6933
Telas	37.23	5.02	3.11	27.11	0.37	0.28	25	1.98	6595
Recortes	23.29	2.93	0.89	17.54	0.13	0.15	40	10.07	4005
Desechos de alientos	17.93	2.55	1.13	12.85	0.38	0.06	60	5.10	3265
Afines - 1"	15.03	1.91	0.50	12.15	0.36	0.15	25	44.90	2593

TABLA B  
CONSTANTES DE COMBUSTION

Sustancia	Para 100 % de Aire - total Moles por mol de Combustible					
	Requerido para combustión			Productos de Combustión		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Aire	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Carbón	1,0	3,76	4,76	1,0	-	3,76
Hidrógeno	0,5	1,88	2,38	-	1,0	1,88
Oxígeno	-	-	-	-	-	-
Nitrógeno	-	-	-	-	-	-
Monóxido de carbón	0,5	1,88	2,38	1,0	-	1,88
Dióxido de carbón	-	-	-	-	-	-
Azufre	1,0	3,76	4,76	1,0	-	3,76

Fuente: Referencia (13)

TABLA C FACTOR DE CORRECCION,  $F_H$ . ( 11 )

		BANCOS EN LINEA				BANCOS ESCALONADOS			
	Sl/d	1,25	1,5	2,0	3,0	1,25	1,5	2,0	3,0
	Re								
St/d	2.000	1,06	1,06	1,07	1,0	1,21	1,16	1,06	0,96
1,25	8.000	1,04	1,05	1,03	0,98	1,11	0,99	0,92	0,95
	20.000	1,0	1,0	1,0	0,95	1,06	1,05	1,02	0,93
	2.000	0,95	0,95	1,03	1,03	1,17	1,15	1,08	1,02
1,5	8.000	0,96	0,96	1,01	1,01	1,10	1,06	1,00	0,96
	20.000	0,95	0,95	1,0	0,98	1,04	1,02	0,98	0,94
	2.000	0,73	0,73	0,98	1,08	1,22	1,18	1,12	1,08
2,0	8.000	0,83	0,83	1,0	1,02	1,12	1,10	1,04	1,02
	20.000	0,90	1,0	1,0	1,0	1,09	1,07	1,01	0,97
	2.000	0,66	0,66	0,95	1,0	1,26	1,26	1,16	1,13
3,0	8.000	0,81	0,81	1,02	1,02	1,16	1,15	1,11	1,06
	20.000	0,91	0,91	1,01	1,0	1,14	1,13	1,10	1,02

TABLA D ESFUERZOS APROVECHABLES PARA TUBOS SIN COSTURA (12)

Material	ASTM Especificacion	Grado	Valores de Esfuerzos, psi. para Temperaturas en F:									
			- 2 a 650	700	800	850	900	950	1000	1100	1200	
Acero al carbono	A53, A106	A	12000	11650	9000	7100	5000					
		B	15000	14350	10800	7800	5000					
Carbon Molibdeno	A335	P1	13750	13750	13450	13150	12500					
1/2 % Cr - 1/2 % Mo	A335	P2	13750	13750	13450	13150	12500	10000	6250			
1 % Cr - 1/2 % Mo	A335	P12	15000	15000	14750	14200	13100	11000	7500	2800		
1 1/4% Cr - 1/2 % Mo	A335	P11	15000	15000	15000	14400	13100	11000	7800	4000		
2 1/4% Cr - 1 % Mo	A335	P22	15000	15000	15000	14400	13100	11000	7800	4200		
3 % Cr - 1 % Mo	A335	P21	15000	14800	13900	13200	12000	9000	7000	4000		
5 % Cr - 1/2 % Mo	A335	P5	...	13400	12800	12400	11500	10000	7300	3300	1500	

Nota: Los valores de esfuerzos para temperaturas intermedias pueden ser obtenidos por interpolacion.

## BIBLIOGRAFIA

1. Pazmiño. Marco ., Consulta privada.  
febrero 1991 . ESPOL. Guayaquil.
2. Moran. Hector & Silva Juan de Dios. " Diseño y construcción de un incinerador para la E.P.N." Tesis. 1979. Quito.
3. Boyen. John L. " Thermal energy recovery ".  
2da. Edición. 1980
4. Stedfeldt. Per. " Un estudio básico de las condiciones para una planta de gasificación de los desperdicios sólidos municipales en Guayaquil/Ecuador ".1990
5. Tillman. David A. & Rossi. Amadeo J. & Vick. Katherine M. " Incineration of municipal and hazardous solid wastes ".
6. ESPOL. "Introducción a la maquinaria ". 1981.
7. Mariño. Rafael, S.I. " Producción y transmisión industrial de calor ". 2da. Edición. 1947
8. Shild. Carl D. "Calderas. Tipo, características y su funcionamiento ". McGraw - Hill Book Company. 1961.



9. Barnard. William N, M.E. & Ellenwood. Frank O, A.B.,M.E. & Hirshfeld. Clarence F.,M.M.E., D.Eng. " Heat power engineering ". 3ra. Edición. 1935
10. Instituto Mexicano del petroleo & Colegio Regional de Ingenieros Químicos del Litoral. " Instrumentación. Control y Operación de Calderas ". 1984
11. Ganapathy. V. " Applied heat transfer ". PennWell Publishing Company. Oklahoma. 1982
12. Potter. Philip J. " Power plant theory and design" 2da. Edición. 1976
13. The Babcock & Wilcox. " Steam its generation and use ". 37va. Edición. New York. 1963
14. De Lorenzi. Otto, M.E. " Combustion engineering " 1ra. Edición. New York. 1948
15. Keenan and Kays. " Tablas de vapor ". ESPOL. 1989