



\*D-4066\*



Rubén Carrion<sup>T</sup> 21.402  
6/3/03. M743

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

Diseño, Construcción y Evaluación de un  
Horno para Pruebas de Combustibles

**TESIS DE GRADO**  
**Previa a la Obtención del Título de**  
**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

LUIS ALBERTO MONGE MONGE

Guayaquil - Ecuador

1 9 8 1



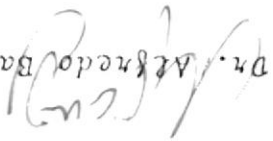
BIBLIOTECA

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN  
HORNO PARA PRUEBAS DE COMBUSTIBLES".

DIRECTOR DE TESIS

  
Dr. Alfredo Barriga

A U T O R

Luis Alberto Monge Monge

## DECLARACION EXPRESA

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

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL.

DEDICATORIA:

A MI QUERIDA MADRE.

AGRADECIMIENTO:

*Al Director de Tesis Dr. Alfredo Barriga,  
A mi prima Jackelinne  
A mis compañeros y personal del Labora-  
torio de conversión de energía que co -  
laboró.*

37

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACION DE UN HORNO PARA  
PRUEBAS DE COMBUSTIBLES.

	Pag.
PROLOGO	9
CAPITULO 1 INTRODUCCION	
1.1 Alcance del proyecto	10
1.2 Tipo de combustible	12
1.3 Tipo de horno	41
1.4 Tipo de quemador	47
CAPITULO 2 ANALISIS DE LOS PROCESOS TERMICOS REFERENTES AL HORNO	
2.1 Procesos térmicos	49
2.1.1 Conducción	50
2.1.2 Radiación	54
2.1.3 Convección	67
CAPITULO 3 DISEÑO DEL TUNEL DE PRUEBAS	
3.1 Determinación de la forma	76
3.2 Elección de la temperatura del túnel	83
3.3 Selección del aislamiento	87
3.4 Pérdidas de calor en las paredes	98
3.5 Flujo de calor	
3.5.1 Paredes	105
3.5.2 Carga	106
3.5.3 Productos de la combustión	108
CAPITULO 4 PUNTO DE OPERACION	
4.1 Selección de quemador	109
4.2 Determinación de la mezcla aire/combustible	109

CAPITULO 5	EQUIPO AUXILIAR	
5.1	Chimenea y ductos de escape	110
5.2	Suministro de combustible	113
5.3	Suministro de agua	114
CAPITULO 6	PRESENTACION DE RESULTADOS	
6.1	Contorno de temperatura en los planos cen- trales: horizontal y vertical ( en el sen- tido de la llama )	114
6.2	Eficiencia de trasmisión	115
6.3	Análisis de los productos de la combustión	116
6.4	Eficiencia de combustión	117
CAPITULO 7	ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
7.1	Eficiencia de combustión	117
7.2	Evaluación del quemador	117
CAPITULO 8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
APENDICE	._ Figuras	122
	._ Tablas	147
	._ Gráficos	
REFERENCIAS	BIBLIOGRAFICAS	175

## PROLOGO

Esta tesis ha sido escrita con el fin de retribuir en algo a la Institución y por su intermedio a la comunidad ecuatoriana presentando soluciones a problemas a que se ve avocada la industria, aplicando conocimientos científicos y con la firme convicción de que el diseño en Ingeniería es una actividad que puede investigarse, analizarse y enseñarse. Creo que el resolver los problemas similares a los que se ha intentado en esta obra que es una actividad de alto nivel intelectual, en la cual el diseño es una parte especial.

Esta obra no colma todos mis anhelos y aspiraciones debido a que hay mucho que se debe hacer. Tal como está constituido puede usarse como una guía en proyectos de este tipo.

## CAPITULO 1

## INTRODUCCION

## 1.1

## ALCANCE DEL PROYECTO

El uso de combustible derivados del petróleo para procesos industriales se encuentra bastante difundido en el mundo contemporáneo. En nuestro medio en particular, abundan los hornos y calderas que utilizan combustible refinado (diesel principalmente) combustibles residuales (fuel oil). Existen así mismo una variedad relativa de hogares, quemadores y configuraciones geométricas en los diversos sistemas.

Dos tipos de estudio pueden hacerse en los sistemas convencionales, los unos son meramente teóricos y consisten en establecer un cálculo estimativo de la operación de un hogar basado en consideraciones tanto teóricas como empíricas. Las posibilidades de acierto dependen de la aplicabilidad de los métodos que se usen así como de la validez de las consideraciones que se hagan.

El segundo método consiste en hacer prueba de campo en el propio equipo. Caso concreto sería por ejemplo el uso de un combustible distinto del combustible de diseño del sistema o la adopción de ciertas modificaciones en el sistema por ejemplo intercambiadores, recuperadores, etc. Este es un proceso de tanteo que por lo general resulta costoso y cuyos resultados no siempre pueden interpretarse correctamente por la dificultad de estudiar la variación de parámetros aislados.

Un método alterno que se implementa en el presente proyecto, consiste en la simulación del proceso por medio de una unidad representativa a escala del hogar que se quiere estudiar. Ello implica el diseño y construcción de un modelo experimental que cumpla con ciertas consideraciones básicas de semejanza con equipos reales y que permite el estudio aislado de los parámetros más importantes.

El presente proyecto se concreta en el cálculo, diseño, construcción y evaluación preliminar de un horno experimental que

permita la simulación de hogares y fogones industriales. Se deja constancia que por tratarse de un primer esfuerzo en esta dirección en nuestro medio, se ha hecho énfasis en el cálculo y en la selección de materiales para la construcción. Se deja así mismo constancia que se ha trabajado dentro de los límites de recursos de la Institución en la confianza que se deían sentar bases sólidas para la continuación de estudios posteriores.

El equipo experimental está constituido principalmente por el hogar, quemador, carga térmica y ducto de salida. El diseño completo es bastante más extenso que la construcción a la que se llegó en este proyecto todas las limitaciones arriba mencionadas y considerándose este proyecto como la primera etapa de un esfuerzo global que permite prueba completa de hogares de equipos industriales. Se han usado materiales obtenibles localmente y la construcción del equipo se lo hizo enteramente con personal del Laboratorio de Conversión de Energía de la ESPOL. La disponibilidad de equipos tiende a ser una fuente limitante en proyectos de este tipo.

En resumen se ha diseñado y construido un equipo experimental que permita el estudio del rendimiento térmico de combustibles y quemadores, así como la eficiencia de transmisión a niveles del hogar y carga térmica bajo condiciones que simulan muy cercanamente condiciones reales de operación. Se espera que se continúe adelante con etapas subsiguientes del proyecto que permitan a la ESPOL contar con un equipo completo para pruebas experimentales de hogares industriales y que permita establecer más adelante el efecto de los diversos parámetros sobre la eficiencia de transmisión. Este equipo podría así mismo permitir pruebas con diversos tipos de mezcla de combustibles y aditivos, así como el estudio de la generación y control de contaminantes originados en la combustión.

## 1.2

## TIPO DE COMBUSTIBLE

En general los combustibles pueden clasificarse bajo tres encabezados:

- 1) Combustibles Gaseosos
- 2) Combustibles Líquidos
- 3) Combustibles Sólidos

Los Combustibles Gaseosos pueden ser de origen natural, como el gas natural, el propano y el butano, o fabricados a partir de los combustibles primarios sólidos, líquidos o gaseosos.

Los procesos de fabricación pueden clasificarse ampliamente como sigue:

- 1) Los basados en la acción del aire, y el vapor de agua o del oxígeno y del vapor de agua, sobre combustibles sólidos que están a temperatura elevadas.
- 2) Los basados en la acción del calor sobre los combustibles sólidos, líquidos o gaseosos a temperaturas más o menos elevadas.
- 3) Combinación de las dos clases anteriores.
- 4) Procesos especiales químicos o físicos.

Los combustibles gaseosos de la primera clase son el gas de gasógeno, el gas de alto horno y el gas de agua azul; de la segunda clase, el gas de horno de coque, el de hulla y el gas de refinería de petróleo, de la tercera clase, el gas de agua carburado, los gases reformados, y el gas de aceite Dayton; y el de cuarta clase, el acetileno y el hidrógeno industrial.

Los combustibles gaseosos contienen uno o varios de los gases combustibles comunes, hidrógeno, óxido de carbono, y los hidrocarburos simples y en la mayoría de los casos anhídrido de carbono, nitrógeno, vapor de agua y oxígeno, los dos últimos en concentraciones relativamente bajas. La densidad, el poder calorífico y otros datos de los gases combustibles particulares se dan en tablas.

Los diferentes métodos para el análisis de gases compren

den la absorción, la destilación, la combustión, la espectroscopia de masas, la espectroscopia infrarroja y la cromatografía de tabiques gaseosos. Los métodos de absorción, como el de Orsat y Hempel, comprende la absorción de los constituyentes individuales, uno cada vez por disolventes adecuados y el registro de la contracción volumétrica que se mida. Los métodos de destilación, como el de Podbielniak, se basa en la separación de los constituyentes por destilación fraccionada y en la medida de los volúmenes de destilados. En los procedimientos de combustión, se queman ciertos elementos combustibles hasta que den  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y para calcular la composición se utilizan las variaciones de volumen. Esto se combina en muchos casos con técnicas de absorción. La utilización de los procedimientos de espectroscopia de masas e infrarrojo ha crecido últimamente con buen provecho; los costos de los instrumentos para ambos métodos son elevados, pero sus resultados son buenos.

La cromatografía de gases es el último método inventado por el análisis de los gases y ha demostrado ser de inmenso valor. El costo del equipo es bajo, el tiempo necesario para el análisis corto, la exactitud excelente y pueden emplearse muestras muy pequeñas. El procedimiento se ilustra como sigue. La muestra que se ha de analizarse se introduce en una sección arrollada en forma de serpentín de un tubo de cobre de  $3/8$ " de diámetro y de 3 a 1,5 m de largo, encerrada en un baño a temperatura constante. Dicho tubo de serpentín se llena con un sólido inerte, como ladrillo refractario o Celita machacado, y se moja dicho ladrillo con líquido orgánico de alto punto de ebullición; después de introducir la muestra se hace circular por el serpentín un gas portador, como helio. Los constituyentes del gas se van separando a medida que son forzados sobre el líquido estacionario y salen del serpentín por una célula detectora de con

ductividad térmica. Las variaciones de ésta, cuando se comparan con las observadas en curvas o gráficas de calibración, se utilizan para medir directa y exactamente el porcentaje de cada componente del gas.

La densidad específica de los gases se puede determinar de una manera conveniente y exacta en una balanza de densidades, observando la presión necesaria para producir densidades iguales de los dos gases comparados. La densidad específica se calcula partiendo de la suposición de que la densidad varía en razón directa de la presión a temperatura constante. Bajo condiciones apropiadas este método da una exactitud dentro del  $\pm 0.2\%$ .

También se puede determinar la densidad específica por el método de efusión en el cual se mide el tiempo  $t$  necesario para la efusión, verificada a través de un orificio pequeño, de volúmenes iguales de gases diferentes bajo presiones iguales. La densidad específica se determina partiendo de la suposición de que  $t$  es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad específica.

Los resultados obtenidos por este método dan una exactitud comprendida dentro de  $\pm 2\%$  cuando se observan las precauciones adecuadas, pero sin estas precauciones adecuadas, son comunes errores de más del 10%. Los instrumentos comerciales se han evaluado según su adaptabilidad y su exactitud.

El poder calorífico de los gases se determina generalmente a presión constante en un calorímetro para flúidos, en el cual el calor liberado por la combustión de una cantidad definida de gas es absorbido por una cantidad medida de agua o aire cuyo incremento de temperatura se observa. Los calorímetros cuyo medio de absorción es el agua (tipo Junker) son los usados con más frecuencia para "lecturas en puntos o intermitentes". Aquellos en los que el medio de

absorción es el aire (calorímetros de Thomas), han sido adaptados para registro continuo. Los poderes caloríficos se expresan en calorías por metro cúbico en condiciones especificadas de contenido de vapor de agua, temperatura u presión. En la industria de la fabricación de gas, el volumen standar está basado en gas saturado con vapor de agua a 15.5°C y 762 mm de Hg de presión. El standar de la ingeniería es frecuentemente gas seco a 0°C y 760 mm de Hg el que se emplea frecuentemente.

La ASTM especifica 575 Cal por Kg como el calor latente de condensación del vapor de agua para ser usado en el cálculo de poderes calorífico inferior,  $H_n$ , de los gases a 15.5°C y 760 mm Hg, se puede calcular por medio de la relación.

$$H_n = H_g - 167 w \frac{P}{T}$$

En la cual  $H_g$  Poder calorífico superior, Cal. por m<sup>3</sup> de vapor de agua formado en la combustión de un m<sup>3</sup> de gas seco;  $P$  presión del gas seco, mm de Hg;  $T$  temperatura del gas, grados °K. Para una temperatura de 15.5°C. y una presión de 760 mm de Hg, la relación se transforma en:

$$H_n = H_g - 441 w$$

Los límites inferior y superior de inflamabilidad indican, respectivamente, el porcentaje de gas contenido en el aire, por debajo y por encima del cual la llama no se propaga. Cuando es iniciada la llama en mezclas de composiciones comprendidas dentro de estos límites, se propagará y, por lo tanto, las mezclas son inflamables. Un conocimiento de los límites inflamables y de su empleo en el establecimiento de prácticas de seguridad para el manejo de combustibles gaseosos es de importancia suprema, particularmente en el equipo que ha de colocarse o retirarse del servicio de gas combustible.

El cálculo de los límites inflamables se lleva a cabo por la modificación de Le Chatelier a la ley de las mezclas, la cual es expresada en su forma más simple como sigue:

$$L = \frac{100}{\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \dots + \frac{P_n}{N_n}}$$

L es el porcentaje en volumen del gas combustible presente en una mezcla límite de aire y gas;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  son los porcentajes en volumen de cada gas combustible presente, calculados sobre la "base de aire y materia inerte", de manera que  $\sum P = 100$  y  $N_1, N_2, \dots, N_n$  son los porcentajes en volumen de cada gas combustible presente en una mezcla límite del gas particular y de aire. La relación anterior se puede aplicar a gases cuyo contenido de materia inerte sea del 10% o menos, sin introducir un error absoluto de más de 1 ó 2%, en los límites calculados. En cambio, cuando el contenido de materia inerte excede del 10% los cálculos deben modificarse.

La velocidad de propagación de la llama es de importancia considerable en los problemas de utilización de gas, particularmente en aquellos que tratan sobre proyectos de quemadores y sobre la velocidad de liberación de energía o la intensidad de la combustión. En la Fig. 1 se ilustra la velocidad de la llama de los gases combustibles individuales y de combustibles gaseosos típicos a la presión atmosférica y se define por la velocidad del movimiento lento uniforme de la llama en sentido perpendicular a la superficie de la misma y con relación a la mezcla no quemada. La manera más simple de determinar las velocidades de la llama consiste en dividir el gasto, en volumen, de un quemador Bunsen adecuado, por el área del cono interno de la llama. Los cambios de la composición del gas, de la relación, del combustible al oxígeno presentes en la mezcla quemada y de la temperatura tienen efecto considerable sobre las velocidades de la llama. El efecto de la tempera-

tura puede ser expresado por una relación de la forma  $V = BT^2$ , en la cual  $V$  = Velocidad máxima de la llama, m por seg.,  $T$  = Temperatura absoluta, °K; y  $B$  = factor de proporcionalidad que depende del tipo de gas y que tiene los valores establecidos para los siguientes:

$H_2$ ,  $27.6 \times 10^{-6}$ ;  $CO$ ,  $4.66 \times 10^{-6}$ ;  $CH_4$ ,  $3.34 \times 10^{-6}$ ;  
 $C_2H_4$ ,  $5.98 \times 10^{-6}$ ; gas natural,  $3.59 \times 10^{-6}$ , gas de horno de coque,  $7.94 \times 10^{-6}$ ; gas de agua carburada,  $7.75 \times 10^{-6}$ ;  
 gas azul,  $14.5 \times 10^{-6}$ ; y gas de gasogeno  $3.08 \times 10^{-6}$ . Los valores son para la presión atmosférica.

Las temperaturas de la llama son de interés principalmente en el proyecto de hornos en relación con problemas sobre transmisión de calor y capacidad de los hornos.

La intensidad de combustión o producción específica de la llama pueden usarse para comparar combustibles gaseosos y como índice de los tiempo que necesitan para su calentamiento los hornos y otros equipos. La producción específica de la llama se calcula a partir de la relación

$$J = U \frac{H}{K}$$

en la que  $J$  = producción específica de la llama, Cal por  $m^2$  de área de la boca o lumbrera por seg.;  $H$  el calor desarrollado por  $m^3$  de mezcla de aire-gas;  $U$  = velocidad de la llama, m/seg., y  $K$  = relación del área de la lumbrera al área del cono interno. El resultado del cálculo se expresa así:

- 1) Como producción de la llama primaria cuando se basa en el calor desarrollado en la combustión primaria; o bien
- 2) como la producción total de la llama cuando se basa en el calor total desarrollado tanto en la combustión primaria como en la secundaria. En el cálculo de 1) la producción de la llama primaria

$$H = \frac{h \times x (1 - x)}{(1 - x_t)}$$

En estas relaciones  $h$  = poder calorífico inferior del gas combustible, Cal/m<sup>3</sup>;  $x_t$  = proporción de combustible en la mezcla aire-gas en las proporciones de combinación;  $x$  = proporción de combustible en la mezcla real de aire-gas bajo consideración.

La producción de la llama primaria es máxima a cierta mezcla de aire-gas comprendida entre la mezcla de las proporciones de combinación y las de máxima velocidad de la llama. La producción máxima de la llama total se detiene con una mezcla que tenga un contenido de combustible mayor que el de la mezcla que da la velocidad máxima de llama.

Existen tablas en donde están incluidos el aire necesario para la combustión y los productos de la combustión resultantes de los combustibles gaseosos típicos. Una aproximación conveniente del aire necesario para la combustión por m<sup>3</sup> de gas la da la relación siguiente:

$$\frac{\text{m}^3 \text{ de aire}}{\text{m}^3 \text{ de gas}} = 0.00112x \text{ poder calorífico superior del gas} - 05$$

Una forma más exacta de la fórmula es

$$\frac{\text{m}^3 \text{ de aire}}{\text{m}^3 \text{ de gas}} = \frac{(0.112 \times \text{poder calorífico superior del gas})^{1.06} - 52}{100}$$

Esta relación es verdadera para prácticamente todos los gases combustibles comunes, pero no es estrictamente correcta para los hidrocarburos no saturados. Sin embargo, estos últimos están presentes, por lo general, en concentraciones relativamente bajas y, por lo tanto, la relación es válida para la mayoría de las mezclas de gases combustibles.

Los combustibles líquidos son de origen natural como el petróleo y sus derivados, el alquitrán, la hulla, benceno, alcohol

etilico, alcohol metílico, aceite de squieto y la suspensión de carbón mineral en aceite; y de origen sintético.

La información más detallada sobre muestras de petróleos y de sus derivados figuran en el folleto de la ASTM D 270-55 T. En la presente sección se da una breve descripción de los métodos de análisis y ensayos, con sus designaciones ASTM.

Los llamados productos del petróleo se derivan del petróleo crudo, extraídos de la tierra a través de pozos. Este mineral es un aceite mineral que contiene muchos hidrocarburos, y sus características específicas varían considerablemente. Los petróleos crudos de los campos de Pensylvania-Nueva York y Ecuador depositan un material de la consistencia de la cera, la parafina, al enfriarse, y se les conoce como petróleos de base parafina. Los petróleos de California y del Golfo noscen a veces materiales asfálticos y se les llama con frecuencia petróleos de base de asfalto, pero es preferible emplear el término base de nafteno porque los petróleos de mejor clase o grado de este tipo contienen poco y a veces nada de asfalto. Los petróleos de base intermedia producidos en los campos petrolíferos de América, tienen algunas características de los petróleos de base parafínica y de los de base nafteno. Aproximadamente el 85% de los petróleos crudos del mundo pertenecen a las tres clases anteriores.

La densidad relativa o específica de los petróleos crudos está comprendida generalmente entre 0.89 y 0.97, la densidad A.P.I. entre 45 y 15 grados. El punto de inflamación suele ser inferior a 32 grados centígrados, y la composición química, en peso es de 84 a 88% de carbono y 11.5 a 14.5% de hidrógeno con pequeños porcentajes de impurezas como agua, azufre, oxígeno y nitrógeno. El contenido de azufre es con frecuencia inferior al 1%, pero puede llegar a ser hasta de 4 a 5%. La tabla 1 da algunos datos de petróleos crudos de diversos campos y sobre sus productos de destilación.

Los petróleos crudos se usan raras veces como combustibles porque son más valiosos cuando se refinan para formar derivados del petróleo. El primer proceso de refinado es ordinariamente una destilación simple que separa el petróleo crudo en fracciones que corresponden aproximadamente a la gasolina, el kerosene o petróleo de lámpara, el aceite de gas (gas oil), el aceite lubricante y los residuos que se incorporan en aceites combustibles más pesados. Se obtiene más gasolina haciendo pasar las fracciones de la destilación, y a veces el petróleo crudo, cuando contiene poca gasolina original, a través de alambiques de sintegradores (Crackin till), en los cuales por la acción del calor, con presión o sin ella en presencia de un catalizador, se descomponen algunos de los hidrocarburos más pesados de gran peso molecular sediendo gasolina, gas y coque. En la figura 2 aparecen algunas curvas típicas de destilación para varios de estos productos. Los productos residuales, sin refinación apreciable se venden como combustible industrial o para buques.

Los productos del petróleo se venden en los Estados Unidos por barriles de 42 galones y en el Ecuador por galones correctos a 15,5°C. Su densidad específica se expresa en una escala arbitraria de unidades llamadas grados A.P.I. (American Petroleum Institute) del Instituto Americano del Petróleo también la han aprobado la ASTM (Sociedad Americana de Ensayo de Materiales), la oficina norteamericana de minas, la oficina norteamericana de normas y se recomiendan para uso exclusivo en la industria del petróleo en los Estados Unidos, habiendo desplazado a la escala Baumé para líquidos más ligeros que el agua. La relación entre los grados A.P.I. y la densidad relativa está expresado por la fórmula siguiente:

$$\text{Grados A.P.I.} = \frac{141,5}{\text{Dens. Relat. } 60^{\circ}/60^{\circ}\text{F}} - 131,5$$

La expresión densidad relativa 60°/60°F o bien 15,5/15,5°C, significa que los dos cuerpos cuyas masas o pesos se relacionan a 60°F (15,5°C).

El poder calorífico superior de los productos del petróleo se determinan por combustión efectuada en una bomba calorimétrica con oxígeno a presión (ASTM D240-50). También se puede calcular en productos exentos de impurezas, por la fórmula:

$$Q_v = 12400 - 2100 d^2$$

En la cual  $Q_v$  es el poder calorífico superior a volumen constante en CAL o Kg. y  $d$  es la densidad específica a 15,5/15,5°C.

El poder calorífico inferior a presión constante,  $Q_p$ , se calcula por:

$$Q_p = Q_v - 50.4H$$

En donde  $H$  es el porcentaje, en peso del hidrógeno que se obtiene por:

$$H = 26 - 15d$$

En la tabla 2 aparecen los calores de combustión típicos de los aceites en petróleo exentos de agua, ceniza y azufre, estimados en una exactitud del 1% para productos normales.

Se debe corregir el poder calorífico por el porcentaje apreciable de material incombustible presente. Cuando el petróleo contiene mucho azufre se debe corregir el resultado usando un poder calorífico superior a 2250 CAL por Kg para el azufre. Los poderes caloríficos calculados llevan la posibilidad de ser demasiado grandes para aceites de alta desintegración o disociación (cracking) y para los productos que contiene compuestos aromáticos como el bencol.

Faragher, Moller y Essex proponen para el poder calorífico superior de los aceites combustibles pesados desintegrados, la cantidad de:

$$Q_p = 9802 + 30 \text{ (por grados A.P.I.)}$$

Esta cantidad debe corregirse por impurezas combustibles, pero Faragher, Moller y Essex han demostrado que una gran parte del llamado aceite combustible tiene sólo una potencia térmica ligeramente más baja que el aceite y que cualquier error debido a la falta de consideración de esta impureza es ordinariamente despreciable.

El calor específico  $C$  de los productos del petróleo a la temperatura  $t$  grados centígrados está representada por la ecuación:

$$C = \frac{0.402 + 0.00081t}{d^{0.5}}$$

El calor de vaporización  $L$  (cal sobre Kg) puede calcularse por la fórmula:

$$L = \frac{60 - 0.09t}{d}$$

El calor de vaporización por litros (a 15.5°C)

$$Ld = 60 - 0.09t$$

Lo cual indica que el calor de vaporización por litro depende solamente de la temperatura de vaporización,  $t$  en la tabla 3 aparecen los datos típicos para los productos del petróleo.

La exactitud de los datos anteriores es del 10% cuando la vaporización se efectúa a la temperatura sensible constante y a presiones inferiores a 3.5 Kg sobre  $\text{cm}^2$ , sin transformación química. Los valores son demasiado altos para vaporización a presiones elevadas y demasiado bajas, por más de 10%, para productos que contengan cantidades grandes de los términos inferiores de la serie aromática (benceno). La gasolina en nuestro proyecto carece de importancia por lo tanto nos limitamos a mencionar como un combustible obtenido del petróleo.

El kerosene es menos volátil que la gasolina y se obtiene continuando la destilación del petróleo crudo después de haber recuperado la gasolina. Se reconocen generalmente dos tipos de kerosene el kerosene normal usado como combustible para iluminación o calefacción con quemadores o quinqués alimentados por mecha; el kerosene para máquinas o vaporización comúnmente conocido como kexex. Las propiedades generales del kerosene son densidad A.P.I. 50 a 35° a 15.5°C; densidad específica 0.78 a 0.85 a 15.5°C; punto de inflamación en recinto cerrado 38 a 71°C; poder calorífico superior 10775 a 11220 Cal sobre Kg; intervalo de destilación 93 a 315°C; composición química 85 a 88% de carbono; 15 a 12% de hidrógeno, hasta 0.5% de azufre y ordinariamente porcentajes despreciables de nitrógeno y oxígeno.

El aceite de gas (Gas Oil) se reconoce en la destilación del petróleo crudo entre el kerosene y el aceite lubricante ligero. Su nombre se derivó del hecho de que alguna vez se empleó en la preparación del gas de alumbrado. El destilado ha aumentado de valor en la industria del aceite como materia prima para la desintegración o disociado por pirólisis (cracking), como combustible diésel ligero y como aceite combustible doméstico, y por ello la industria del gas ha encontrado económico el empleo de aceites combustibles pesados en vez del aceite de gas, el aceite de gas,

como tal, es, por tanto de poco interés como combustible industrial.

Las características del combustible diesel varían muchísimo desde destilados ligeros que son prácticamente kerosenes pesados hasta combustibles residuales o petróleos crudos, que se usan en casos contados. La densidad A.P.I. varía aproximadamente de 40 a 17.5° a 15.5°C; la densidad específica de 0.82 a 0.95 a 15°C; - el poder calorífico superior a 10275 a 11.110 Cal por Kg; el intervalo de destilación de 175 a 370°C o más alto; composición última o por elementos, carbono 85 a 88%, hidrógeno 15 a 10%, azufre hasta 2%, oxígeno y nitrógeno combinados hasta 2%. La amplia variedad de combustibles es consecuencia de los numerosos modelos de motores no todos los cuales pueden consumir cualquier combustible cuyas características estén dentro de estos límites que son adecuados para diferentes clases de motores. Las especificaciones militares de los Estados Unidos dadas en la tabla 4, ilustra las exigencias de un combustible de alto grado con garantías de comportamiento satisfactorias.

Grado 1-D. Un aceite combustible destilado volátil para motores cuyo servicio requiere cambios frecuentes de velocidad y de carga.

Grado 2-D. Un aceite combustible destilado, de baja volatilidad para motores en servicio industrial o móvil pesado.

Grado 4-D. Un aceite combustible para motores de velocidad baja y media. Las condiciones de los combustibles diesel, particularmente los de motores de alta velocidad, se están desarrollando aún, y hasta ahora difieren las opiniones sobre ellos. Se reconoce que la velocidad del motor y el modelo son importantes y que la calidad de inflamación o ignición, limpieza de la combustión y viscosidad cobran importancia creciente a medida -

que aumenta la velocidad del rotor, con ello la de combustión.

Los efectos debido a las características químicas y físicas son interpretadas por mediciones de la calidad de ignición del combustible. Los ensayos en motores parecen ofrecer la me jo r medida de la calidad de ignición, pero también se emplean ensayos químicos y físicos.

El índice de cetano calculado, ASTM, puede emplearse para estimar el número de cetano de los combustibles diesel cuando no sean factibles los ensayos en los motores. Se aplica esto a los combustibles de destilación directa y de la catalítica - destructiva, de la mezcla de dichos combustibles. El índice se calcula partiendo de la densidad y del punto medio de ebullición del combustible. No se aplica a los que contienen adi tivos para elevar el número de cetano, a los combustibles sintéticos, a los productos de alquitrán de hulla, y a los aceites crudos o residuos pesados.

La calidad de los actuales diésel, se indican en las ins pe cc io ne s o estudios anuales de los productos comerciales.

Para asegurar la limpieza de los combustibles, se emplea un ensayo para agua y sedimento. En este ensayo se mezcla el combustible con una cantidad igual de bencol y se centrifuga - para que se desprendan el agua y el sedimento hacia el fondo - del recipiente, en donde se puede determinar el porcentaje en volumen. Los combustibles destilados de baja viscosidad están esencialmente exentos de estas impurezas, pero los combustibles viscosos en los que se agrega aceite residualmente puede contener hasta un 2%.

Las cenizas representan al material incombustible que puede ser abstracto y, por lo tanto indeseable. Para determinar la ceniza que queda en la muestra del aceite y se considera el residuo incombustible como ceniza. Los combustibles destilados raras veces contienen más de trazas de ceniza, pero los combustibles más pesados pueden contener cantidades apreciables.

El residuo de carbón (ASTM D189-52) se determina calentando a alta temperatura una muestra de combustible, en ausencia de aire con el fin de que se desprenda todo el material volátil. El residuo incluye normalmente, a más del sedimento y las cenizas, carbón libre procedente de materiales que se desintegraron térmicamente o desdoblaron antes de destilar. El ensayo tiene por objeto dar información sobre las propiedades "Formadores de carbón o carbonillas" del aceite, pero cualquier correlación no es perfecta porque el residuo contiene material combustible que puede arder bajo las condiciones de la cámara de combustión. Se evita usar combustibles con residuos excesivos de carbón para motores de alta velocidad porque a veces dejan depósitos sobre las toberas de inyección que distorsionan el chorro atomizador y producen combustión incompleta.

Se usan dos límites en la especificación de la viscosidad de los combustibles ligeros: el límite inferior asegura la lubricación de las partes muy bien ajustadas de las bombas y las toberas de inyección del combustible y restringe las fugas, ya que los pistones y válvular de estas partes no tienen normalmente empaquetaduras; el límite superior asegura un combustible suficientemente ligero para dejarse pulverizar adecuadamente al pasar a través de la tobera de atomización. Las limitaciones impuestas sobre las características de destilación están normalmente restringidas al 90% o a las temperaturas del punto final para excluir cantidades apreciables de combustibles residuales pesados,

los cuales bajo ciertas condiciones tienden a producir depósitos indeseables al arder irregularmente.

El aceite combustible tiene una densidad A.P.I. que varía ± próximadamente de 40 a 10 grados a 15.5°C, la densidad específica de 0.82 a 1.00 a 15.5°C; el poder calorífico superior de 10000 a 11110 Cal sobre Kg; el intervalo de destilación de 175° a 370°C y superiores, composición química carbono 85 a 90%, hidrógeno 15 a 8%, azufre hasta 2%.

El aceite combustible se suministra comercialmente en cinco grados con las exigencias dadas por el estándar comercial CS 12-43 promulgado por el NBS de la ASTM D396-48t.

Las designaciones antiguas de los aceites combustibles para buques de A B y C están siendo abandonados. El aceite C para buques corresponde al #6, y los A y B están en las clases #5 y #6.

Los combustibles 1, 2 y 4 se usan primordialmente en quemadores de uso doméstico de calefacción y son llevados hasta el quemador sin precalentamiento.

El agua y el sedimento normalmente se puede separar con facilidad de los aceites de los grados 1, 2 y 4, pero son más difíciles de separar de los aceites de los grados 5 y 6. Estos últimos aceites contienen con frecuencia productos residuales que forman fácilmente emulsión con el agua y sedimento, de manera que la presencia de estos materiales es difícil de percibir por inspección.

El ensayo para residuo de carbón sirve para descubrir los productos residuales pesados en los aceites de viscosidad mediana y en las mezclas. El equipo para quemar aceites pesados se proyecta ordinariamente para hacer mínima la formación de carbón o se dispone para el fácil reemplazamiento de quemadores cuando esten sucios. Para los destiladores ligeros en quemadores que pueden ser afectados seriamente por la formación de carbón, el ensayo se hace sobre el último residuo del 10% procedente de la destilación. Luego son considerados los resultados como el residuo de carbón sobre residuo del 10%.

Las impurezas que producen cenizas son con frecuencia sales naturales presentes en el petróleo crudo o sustancias químicas usadas en las operaciones del refinado, pero también pueden ser incrustaciones o polvos recogidos de los recipientes y tuberías a causa de una manipulación impropia.

Algunas impurezas productoras de cenizas originan un deterioro rápido de los materiales refractorios de la cámara de combustión particularmente a temperaturas elevadas; algunas son abrasivas y destructoras, por tanto, de las bombas, válvulas, equipo de regulación y piezas de los quemadores. Se incluyen las especificaciones de la ceniza para hacer mínimos estos inconvenientes de funcionamiento.

En algunos casos, los aceites pesados depositan cantidades excesivas de lodo en los tanques de almacenamiento o en los calentadores. Se consigue cierta protección contra esto por la adición de pequeñas cantidades de ciertos compuestos orgánicos o sales. La depositación de lodo ocurre a veces cuando son mezclados dos aceites de diferentes características y deben tomarse las debidas precauciones cuando se agregue un aceite nuevo de características desconocidas.

Los aceites combustibles consisten generalmente de un residuo pesado que es cortado o diluido con un aceite cortador más ligero, con el fin de que satisfagan las exigencias de viscosidad y punto de fluidez.

El residuo puede contener materiales insolubles, el cual puede formar lodo en los tanques y depósitos en los calentadores. La mezcla efectuada al azar con otros combustibles puede causar dificultades. La adición de un aceite cortador, que sirve como disolvente, es generalmente perjudicial para los agentes peptizantes presentes. Las cualidades peptizantes de los componentes residuales deben compensarse contra las tendencias precipitadoras del diluyente.

Al mezclar combustibles, los elementos constituyentes o ceros de uno de los aceites pueden actuar como agentes precipitadores sobre el residuo del combustible con el que son mezclados. El agua puede ser absorbida por los asfaltos no protegidos para formar depósitos de lodo.

El alquitrán de hulla es recobrado como subproducto de la carbonización o destilación de la hulla, sus características específicas varían con la temperatura a la que hayan sido calentados el carbón durante su destilación y con la duración del proceso. Los cambios de características son graduales a medida que aumenta la temperatura de destilación y tienen los siguientes límites para el intervalo 500 a 1000 °C; densidad específica 0.95 a 1.25 a 15.5 °C, poder calorífico superior 1610 a 8890 Cal/Kg; destila a 350°C; 60 a 35% pez(residuo), 40 a 65%; análisis último por elementos en porcentajes: carbono 84 a 91; hidrógeno 9 a 5; oxígeno 7 a 2%. El oxígeno de los alquitranes es afectado por la calidad del carbón destilado. El nitrógeno 0.6 a 13% y el azufre 1.3 a 1% son influidos por las características del carbón.

Los alquitranes constan principalmente de compuestos arómaticos, el destilado contiene bases de alquitrán, ácidos de alquitrán, y aceites neutros. Los aceites neutros predominan en cantidad, pero sus características cambian a medida que aumenta la temperatura de destilación del carbón.

En el intervalo de temperaturas mencionado antes, los constituyentes aromáticos aumentan de 45 a 85%, las parafinas disminuyen de 45 a 5%, las olefinas permanecen constantes (10%).

El alquitrán de carbón puede ser quemado con el equipo adecuado para aceites combustibles pesados, si es calentado para reducir su viscosidad y ayudar a la atomización.

Tal uso es limitado en los Estados Unidos. En Europa los destilados de alquitrán, particularmente los aceites neutros son usa

dos como combustible para motores de combustión interna, particularmente en los del tipo diesel, Los resultados son regularmente satisfactorios con motores de baja velocidad, pero en los de alta velocidad dan mejores resultados estos aceites si se mejoran mezclándolos con combustibles mejores. En cualquiera de los casos hay posibilidades de que el arranque del motor presente dificultades.

El benceno,  $C_6H_6$  es un subproducto de la destilación de la hulla a alta temperatura y también un producto, ahora derivado en grandes cantidades, de la destilación del petróleo. Se usó en años pasados el benceno como componente mezclador de las gasolinas con objeto de aumentar su número de octano, pero su demanda, como disolvente y como material indicador de los componentes del caucho sintético y de los plásticos y de los productos petroquímicos, ha impedido que siga adicionándose a las gasolinas para motores.

La mayoría de las gasolinas contienen porcentajes importantes de benceno y tolueno.

El alcohol etílico,  $C_2H_5OH$ , ha sido usado durante muchos años como combustible para motor mezclado con gasolina, particularmente en Europa de 5 a 25% del alcohol anhidro es usado en mezclas comerciales. Se aducen en su favor ventajas técnicas debido a su alto número de octano, 99, y su elevado calor latente de vaporización, 204Cal sobre Kg. El poder calorífico superior, 7115 Cal sobre Kg, es relativamente bajo si se compara con el de la gasolina, de manera que el consumo específico de combustible para potencia máxima es mayor. La densidad específica de 0.794 a 15.5 °C.

El alcohol metílico  $CH_3OH$ , se usa ocasionalmente en mezclas de combustibles especiales. Su número de octano es 98, poder calorífico superior, 5330Cal sobre Kg; y su densidad específica, 0.797 a 15.5 °C.

El aceite de esquisto es semejante al del petróleo, y es producido por el calentamiento del esquisto aceitoso en ausencia de

aire. A temperaturas suficientemente elevadas, la materia orgánica contenida en el esquisto llanda comunmente "Kerogen", se transforma en aceite, gas y carbono fijo. A partir del aceite crudo de esquisto, se pueden preparar productos muy parecidos a los extraídos del petróleo, por procesos de destilación y refinado semejantes a los usados en el refinado del mismo.

Las suspensiones de carbón mineral en aceite, citados a veces como combustibles, son mezclas fluidas de carbón pulverizado en suspensión, ya sea en aceite combustible o bien en aceite de alquitran de hulla. Las experiencias indican que se puede preparar un combustible práctico por suspensión del 40% en peso de carbón pulverizado (98 a 99% debe pasar a través de una malla #200) en aceite combustible pesado. La mejor oportunidad para el consumo con éxito de las suspensiones de carbón en aceite la ofrecen las instalaciones grandes.

Además de los combustibles naturales tenemos los combustibles líquidos sintéticos, para cuya fabricación existen dos procesos:

- 1) Hidrogenación de la hulla basada en el proceso "Bergius".
- 2) Síntesis por reducción catalítica del óxido de carbono con hidrógeno, basada en el tipo de reacción Fischer-Tropsch.

Ambos procesos se han explorado industrialmente fuera del hemisferio oeste y en los Estados Unidos las investigaciones para adaptarlos a sus recursos y a su economía.

En la hidrogenación del carbón, el carbón mineral pulverizado y un catalizador adecuado son reducidos a una pasta con un aceite como vehículo. Esta pasta es bombeada continuamente al convertidor primario, en donde es licuada por la acción del hidrógeno a presión y altas temperaturas.

Los gases residuales y los aceites de punto de ebullición bajo salen por la parte superior del convertidor. Los aceites más pesados son extraídos, centrifugados y, finalmente, combinados con los aceites que salieron por la parte superior. Este aceite crudo es hidrogenado posteriormente en convertidores secundarios que contienen otros catalizadores para aumentar la separación de los acei-

tes ligeros.

Los productos refinados es probable que sean aromáticos, de manera que la gasolina tenga un número de octano relativamente bueno, pero los combustibles diesel son probablemente menos satisfactorios que los producidos por el petróleo.

El tipo de reacción Fischer-Tropsch comienza con la síntesis de un gas compuesto de óxido de carbono e hidrógeno ordinariamente en la relación 1:2, en volumen. Este gas se hace pasar por catalizador en donde es convertido en su mayor parte en hidrocarburos líquidos, del intervalo de ebullición de la gasolina y el combustible diesel, más una cantidad apreciable de hidrocarburos oxigenados, tales como acetaldehído, acetona y alcoholes. Por este proceso se pueden fabricar gasolina para motor, de número de octano 80 y combustible diesel de número de cetano 50.

Los combustibles sólidos tales como el carbono mineral, coque, turba y madera son de origen natural y o procesador adecuadamente.

El carbono mineral es una sustancia compleja que consta de los residuos más resistentes de la antigua vegetación. Todos los carbonos tuvieron su origen en depósitos de vegetación similar a la de los depósitos de turba de hoy en día. Durante las edades geológicas pasadas, tales depósitos estuvieron sujetos a la acción bioquímica, sumersión, presión y calor. El carbono mineral no es una sustancia uniforme.

El análisis inmediato o análisis aproximado, el azufre y la potencia calorífica del carbono mineral son las características analíticas comúnmente usadas en la industria.

El análisis inmediato de las cantidades relativas de:

1) humedad; 2) material volátil; 3) carbono fijo; 4) cenizas, es decir las impurezas del mineral que quedan en un estado algo modificado después de que el carbono ha sido quemado. La suma de los porcentajes de humedad, material volátil, carbono fijo y cenizas es igual a 100 para el carbono "que se ha demostrado" o sea, "tal como se da por recibido".

Humedad es la pérdida de peso que se obtiene secando el carbón a una temperatura comprendida entre 104 y 110°C, bajo condiciones de norma o estándares. Un calentamiento ulterior a temperaturas más elevadas puede separar más agua, pero esta humedad se considera generalmente como integrante de la sustancia que forma el carbón. La humedad obtenida por el método normalizador consta de: 1) Humedad superficial o extraña, como la que puede provenir de fuentes externas, como aguas de filtración en la mina, condensación del vapor de lluvia o agua de lavadero de carbón; 2) Humedad inherente, llamada algunas veces humedad del filón o manto, la cual está íntimamente sostenida por la sustancia del carbón que no se externa en humedad. El laboratorio no separa estos dos tipos de humedad. El carbón puede ser secado al aire a la temperatura ambiente, o un poco por encima de ella, determinándose así una "pérdida por secado al aire", pero este resultado no sería la humedad extraña. También se evapora una parte de la humedad inherente durante el secado al aire.

Los carbones subbituminosos y el lignito recién extraídos pierden humedad rápidamente al ser expuestos al aire. La humedad extraña o superficial del carbón es una función de la superficie expuesta, siendo cada superficie capaz de sostener una película de humedad. Los tamaños finos mantienen más humedad que los gruesos o terrones. El carbón, que en la mina no contiene más del 4% de humedad, puede, en tamaños menudos, contener hasta 15%, el mismo carbón en tamaños gruesos o en terrones, aún almacenados bajo el agua, puede no contener sino un poco más de humedad, de la que tenía la mina.

En el método de norma o standar, la materia volátil se toma por la pérdida en peso, menos la humedad, obtenida calentando el carbón durante 7 minutos en un recipiente cubierto alrededor de 950°C bajo condiciones especiales. Estas condiciones deben ser seguidas porque la cantidad de materia volátil producida varía con la temperatura y el régimen de calentamiento. La materia volátil no existe en el carbón como tal, sino que es producida por la descomposición del carbón al ser calentado, consta principalmente de

los gases combustibles, hidrógeno, óxido de carbono, metano, otros hidrocarburos, compuestos sulfurosos volátiles y algunos gases in combustibles, como el anhídrido carbónico y el vapor de agua. No incluye la humedad, que puede ser separada del carbón y determina da por el ensayo de humedad. La composición varía muchísimo en los diferentes carbones.

La materia inerte o incombustible puede variar desde 4% de l volátil total, en los carbones de bajo contenido de materia volátil hasta 40% en los subbituminosos.

El método estandar para determinar el carbón fijo consiste en restar de 100 la suma de los porcentajes de humedad, materia vola til y cenizas que da el análisis inmediato.

Es el residuo carbonoso meno la ceniza que queda en el recipien te de ensayo para la determinación de la materia volátil. No repre senta el carbon total contenido en el carbon, ya que una parte con siderable del carbono se desmende en materia volátil combinado con hidrógeno como hidrocarburos y con oxígeno como óxido de carbono y anhídrido carbónico. Tampoco es carbono puro, ya que puede con tener varios décimos por ciento de hidrógeno y oxígeno, 0.4 a 10% de nitrógeno y alrededor de la mitad del azufre que contén a el car bón.

En el método estándar, la ceniza es el residuo inorgánico que queda después de quemar el carbón en un horno de huf la cuya tempe ratura final está comprendida entre 700 y 750°C.

Está compuesta en su mayor parte de compuestos de sílice, alú mina, cal y hierro, junto con cantidades pequeñas de magnesia, tí tanic y compuestos alcalinos, el azufre también concurre. La sílice, la alúmina y el óxido de hierro principalmente de las piritas, y la cal y la magnesia de sus carbonatos y sulfatos correspon dientes.

Estos elementos constituyentes de la ceniza consisten en:

1) impurezas inherentes o intrínsecas que están presentes en una mezcla íntima con la sustancia carbonosa y que se derivan ya sean de la materia vegetal original o de fuentes externas por sedimentación o precipitación ocurrida durante el proceso de acumulación de la vegetación formadora de carbón; 2) impurezas depositadas ya sea durante la formación del manto de carbono o subsecuentemente, lo cual se produce en forma de láminas separadoras, vetas y nódulos de arcilla, esquisto, pirita y calcita; 3) impurezas que se mezclaron mecánicamente con el carbón en el proceso de extracción, tales como fragmento de techo y piso. La ceniza como se determina ordinariamente, pesa menos que la materia inorgánica de la cual se produjo. Esto se debe a la pérdida de constituyentes volátiles y a otros cambios ocurridos durante la combustión. El esquisto y la arcilla pierden su agua de hidratación, los carbones se descomponen, desprendiendo anhídrido carbónico, y la pirita de hierro se transforma en óxido de hierro desprendiendo anhídrido sulfuroso a la atmósfera o cediendo al óxido de calcio libre que ha formado a partir del carbonato. En los carbones que contienen carbonato de calcio, una gran porción del azufre puede quedar retenida en la ceniza en sulfato de calcio.

La composición química del carbón mineral varía ampliamente, pero de ordinario queda dentro de los límites siguientes:

CONSTITUTIVO		PORCENTAJE
sílice	$SiO_2$	20-60
alúmina	$Al_2O_3$	10-35
óxido de hierro	$Fe_2O_3$	5-35
óxido de calcio	$CaO$	1-20
óxido de magnesio	$MgO$	0.3-4
óxido de titanio	$TiO_2$	0.5-2.5
alcalis	$Na_2$ y $K_2O$	1-4
anhídrido sulfúrico	$SO_3$	0.1-12

El análisis último o análisis químico, del carbón, tal como se ha hecho el demuestre, da su composición en porcentajes de cenizas, azufre, carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. La suma de estos elementos constitutivos se toma igual a 100. El hidrógeno y el oxígeno de la humedad de la muestra están incluidos con el hidrógeno y el oxígeno de la sustancia del carbón seco. El contenido de cenizas es el mismo que el del análisis inmediato; el azufre, el carbono, el hidrógeno y el nitrógeno, siendo elementos químicos definidos, se determinan por ensayos químicos. El oxígeno se estima restando la suma de los otros cinco elementos constitutivos de 100. El análisis de un carbón puede calcularse sobre la base de carbón seco; para este fin se precisa una determinación de la humedad, practicando como en el análisis inmediato, con el fin de saber qué partes del hidrógeno y el oxígeno del análisis último son debidas a la humedad.

El poder calorífico de un combustible es el calor producido por la combustión completa de una cantidad unitaria, a volumen constante, en una bomba calorimétrica de oxígeno bajo condiciones normalizadas o estándares. El poder calorífico superior (P.C.S.) puede determinarse aproximadamente calculándolo a partir de sus elementos constitutivos por la fórmula de Dulong como sigue:

$$P.C.S. = 8080 C + 34460 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 22055 \left( \text{Cal/Kg} \right)$$

En donde C, H, O y S son tantos por uno, en peso del análisis químico. Esta fórmula supone que el oxígeno del carbón se combina con parte del hidrógeno para formar agua, quedando el resto del hidrógeno disponible para la combustión junto con el carbono y el azufre. Para las antracitas, semiantracitas y los carbones bituminosos, los poderes calculados están comprendidos ordinariamente dentro del 1.5% de los determinados por la bomba calorimétrica. Para los carbones subbituminosos y ligníticos los poderes calculados muestran desviaciones que con frecuencia alcanzan al 4 y 5%.

El poder calorífico de un combustible puede expresarse sobre las bases "tal como se recibió", "tal como se hizo el demuestre" "seco obien "libre de humedad y cenizas". Sobre la base de libre de humedad y cenizas el poder calorífico de ordinario es regularmente constante para el carbón que sale de una misma mina, y con frecuencia para el carbón que sale del mismo yacimiento o filón. Este hecho ayuda algunas veces a la determinación del probable origen del carbón o de la exactitud de los datos del análisis.

La densidad relativa o específica del carbón es la relación del peso del carbón macizo al peso de un volumen igual de agua. Es útil en el cálculo del peso del macizo de carbón, tal como se presenta en el terreno, para estimar el porcentaje de carbón por unidad de superficie.

La densidad a granel es el peso del carbón en trozos por metro cúbico, incluyendo los huecos.

Un incremento de la materia mineral que forma las cenizas aumentan la densidad específica.

La oficina de minería de los Estados Unidos, ha determinado los pesos por metro cúbico del carbón en trozos, incluyendo los huecos, y estos pesos varían de acuerdo con la densidad específica del carbón, su distribución por tamaños, su contenido de humedad y la cantidad de su asentamiento o sacudimiento cuando son apilados. Las determinaciones hechas con 177 tipos de carbón que varían desde los subbituminoso hasta la antracita arrojaron pesos que variaron de 705 a 945  $\text{kg/m}^3$ , estando apilados flojamente; cuando se apila en capas se compacta, dicho peso puede aumentar tanto como el 25%.

Ordinariamente se puede determinar el peso de combustible que hay en una pila o montón, sólo dentro de un 10 a 15% de error, midiendo su volumen. Algunos pesos típicos de carbón mineral "tal como se recibió" de minas trasplantando el carbón flojamente a dentro de una caja de 8 pies cúbicos ( $0.226\text{m}^3$ ) de capacidad, son

los que siguen: antracita, 801 a 929 carbón bituminoso de contenido bajo y medio de materia volátil, 785 a 913; carbón bituminoso de alto contenido de materia volátil y carbón subbituminoso 673 a 897 Kg/m<sup>3</sup>.

El carbón mineral se clasifica de varias maneras: por su variedad, clase, grado o calidad y algunas veces por su empleo.

Las variedades comerciales del carbón son: carbón común de bandas, carbón de astilla, carbón canel o mate de bujía y carbón bogue.

Carbón común de bandas; la variedad común del carbón bituminoso consta de una sucesión de capas o lenticulos que alternan irregularmente de: 1) material negro homogéneo de lustre vítreo brillante; 2) material negro grisáceo o menos brillante estirado ordinariamente de lustre sedoso; 3) bandas o lenticulos generalmente más delgadas de partículas blandas, pulverulentas y fibrosas de carbón bituminoso y fibroso. La diferencia en el lustre de las bandas es mayor en el carbón bituminoso que en el subbituminoso.

Carbón de astilla, o duro laminado, una variedad del carbón bituminoso que tiene comúnmente un lustre mate y color negro grisáceo de lustre vítreo. Al golpearlo es resonante, es duro y tenaz, se rompe con una fractura irregular, áspera y algunas veces en forma de astillas. No es aglutinante y no se esponja al calentarse.

Carbón canel, una variedad de carbón bituminoso y subbituminoso, compacta y de grano fino con una ausencia de estructura en bandas. Es de color gris a negro, tiene un lustre grasoso y su fractura es notablemente conocida. No se apelmaza, cede un gran porcentaje de materia volátil, arde fácilmente con llama luminosa humeante.

Carbón Bogue, una variedad del carbón bituminoso y subbituminoso, que se parece al carbón canel tanto en su aspecto como en su comportamiento en la combustión. Se caracteriza por su elevado porcentaje de residuos de algas y materia volátil. Al destilarlo -

da cantidades excepcionales de alquitrán y aceite.

Los carbones se clasifican según su clase, esto es, según su grado de metamorfosis o modificación progresiva, en la serie natural del lignito a la antracita. El esquema básico de clasificación se define de acuerdo con el carbono fijo y la potencia calorífica calculados sobre base "libre de materia mineral". Los carbones de más alta clase se clasifican de acuerdo con el carbono fijo sobre la base "seco" y los de las clases inferiores de acuerdo con las calorías sobre la base "húmeda". Se emplean índices de aglomeración y de desmenuzamiento por la intemperie para establecer diferencias entre ciertos grupos adyacentes. La tabla 5 da la clasificación de los carbones por clases que ha sido adoptada como estándar por la ASTM.

Los carbones que muestran índices de acción de la intemperie menores del 5% deben ser considerados como sin acción de la intemperie.

Los carbones que en la determinación de la materia volátil producen ya sea un botón aglomerado que soporte un peso de 0.5Kg sin pulverizarse o bien un botón que muestre esponjamiento o estructura celular se considera aglomerantes.

La posición de un carbón en la escala se expresa en forma condensada, como por ejemplo (62-146). El paréntesis significa que los números contenidos en el son sobre la base "libre de materia mineral". El primer número representa el carbono fijo sobre base seca, referido al porcentaje entero inmediato.

El segundo número representa ~~los~~ BTU sobre base húmeda, expresada por cientos de BTU redondeadas en el centenario inmediato. En cientos de kilocalorías serían 37 en vez de 146.

Para la clasificación del carbón de acuerdo con su clase el carbono fijo de materia mineral (libremn) aplicando ya sea las fórmulas de Parr o bien las fórmulas aproximadas. En el caso de litigio debe usarse la fórmula apropiada de Parr.

$$CF, \text{ en seco, libre-mm} = \frac{CF - 0.15S}{100 - (A + 1.08A + 0.55S)} \times 100$$

$$MV, \text{ en seco libre-mm} = 100 - CF \text{ seco, libre-mm}$$

$$Cal, \text{ en húmedo, libre-mm} = \frac{Cal - 28S}{100 - (1.08A + 0.55S)} \times 100$$

Fórmulas de aproximación:

$$CF, \text{ en seco, libre-mm} = \frac{CF}{100 - (A + 1.1A + 0.1S)} \times 100$$

$$MV, \text{ en seco, libre-mm} = 100 - CF, \text{ seco libre-mm}$$

$$Cal, \text{ en húmedo, libre-mm} = \frac{Cal}{100 - (1.1A + 0.1S)} \times 100$$

En las cuales CF es el porcentaje de carbono fijo; MV es el porcentaje de materia volátil; A es el porcentaje de humedad; Aes el porcentaje de ceniza; S es el porcentaje de azufre, todo sobre base húmeda; Cal es igual a las calorías grandes por Kg. La humedad se refiere al carbón que contienen su humedad natural del ua cimiento, no incluyendo el agua visible depositada sobre la superficie del carbón.

Los valores obtenidos por las fórmulas de aproximación difieren de los calculados por las fórmulas de Parr en cantidades que dependen del análisis del carbón. Las diferencias corrientes varían de 0 a 0.8% en el carbono fijo y de 0 a alrededor de 47 Cal sobre Kg.

El carbón antecita se clasifica por tamaños y sus nombres comerciales son como se indica en la tabla 6.

La clasificación por tamaños y sus nombres comerciales de los carbones de las clases inferiores no ha sido normalizada o estandarizada.

Ciertas variedades de coque son reconocidas por la industria

que dependen de su empleo. Las autoridades de la materia difieren un poco respecto a las propiedades límites de estas diversas variedades, y en algunas localidades se fija la calidad del coque por la de los carbones disponibles para su fabricación. Por ejemplo: los coques occidentales para alto horno, o metalurgia, son más débiles es decir menos resistentes a la compresión que los usadas en el este, porque los primeros son de coquización débil en relación a los de la región Apalachina. Las características mejor reconocidas son las que siguen: El coque metalúrgico o para altos hornos, el coque de fundición, el coque de electrodos, el coque doméstico, el coque de gas de agua, el coque de baja temperatura y el coque fluido. Como vemos en la: tabla 7.

La turba es un residuo pardo oscuro o negro que contiene de 85 a 95% de agua producida por la descomposición y desintegración: parciales de musgos, juncos, árboles y otras plantas. Extraordinariamente friable y su calidad es variable. Color amarillento a pardo y negro; peso en seco 112 a 960 Kg/m<sup>3</sup>. La turba secada al aire es 8 a 18 veces más voluminosa que el carbón para el mismo efecto evaporador, se inflama fácilmente, arde espontáneamente y da rápidamente un calor intenso. Un análisis típico de turba secada al aire en porcentaje es: humedad 256, cenizas 4.6, materia volátil 48.5, carbono fijo 21.3, azufre 0.25; poder calorífico superior 3910 Cal/Kg. De la turba se puede fabricar gas de alumbrado gas de gasógeno y una gran variedad de subproductos valiosos. La tabla 8 da los análisis en porcentaje y las potencias caloríficas de la turba de varias localidades.

La composición aproximada de la madera libre de humedad es: carbono 49, hidrógeno 6, oxígeno 44, cenizas 1%. Esta composición corresponde aproximadamente a  $C_6H_{10}O_5$ . El poder calorífico no puede ser calculado con exactitud a partir del análisis, a causa del elevado contenido de oxígeno y del efecto de las cantidades variables de resinas, el poder calorífico superior promedio de la madera libre de humedad y de resinas es de 4610 Cal/Kg y el

poder calorífico superior de la resina es de unas 9390 Cal/Kg.

Entre las maderas cuyo poder calorífico es influido por los contenidos variables de resinas se cuentan el pino de hoja lar - ga, el pino de hoja corta, el pino lablolly, el pino amarillo - del oeste, el pino piñonero, el cedro, el enebro y el ciprés. La madera verde contiene aproximadamente 50% de humedad, la made - ra seca al aire o curada contiene de 15 a 25% de humedad, y la - secada en estufa u horno, alrededor del 8%. Los análisis de las maderas combustibles típicas aparecen en la tabla 9.

El bagazo de la caña de azúcar de la que se ha extraído el jugo por presión entre los cilindros de un trapiche. Su conteni - do de humedad varía de 40 a 55%. El bagazo tiene una composición en porcentaje de C 43 a 47; H 4.5 a 6.6; O 45 a 49; cenizas 1.5 a 3; su poder calorífico superior varía de 4445 a 4830 Cal/Kg. El bogaço es aproximadamente el que se indica en la tabla 10, - dejando el debido margen necesario para evaporar su humedad y re - calentar el vapor resultante a la temperatura del gas de la chi - menea.

Los desechos de ciudad están compuestos de basura y desper - dicios. El peso aproximado de la basura es de 640 a 705 Kg/m<sup>3</sup>, el de los desperdicios es de 88 a 120 Kg/m<sup>3</sup>. Un análisis típico de la basura es de: humedad 72, materia volátil 21, carbono fijo 3.4, cenizas 3.5, poder calorífico superior 4890 Cal/Kg.

Un análisis en porcentaje de los desperdicios es humedad 7.5 materia volátil 59.5, carbono fijo 13, cenizas y materiales in - combustibles 20; poder calorífico superior 3610 Cal/Kg.

Los materiales incombustibles presentes en los desperdicios ascienden a veces hasta 56% del total.

Después de haber hecho una descripción de los materiales usa - dos como combustibles.

La selección del mejor combustible debe basarse en un estudio de los costos comparativos preparados, en la longiezza del funciona - miento, en su adaptabilidad a la regulación de la temperatura -

en la mano de obra requerida, en el efecto de cada combustible sobre el material que ha de calentarse y sobre el revestimiento del horno, además tener en cuenta la disponibilidad del combustible. Debe dedicarse atención a la cantidad que ha de quemarse en cada quemador, a la temperatura que se desee en el horno, y a la uniformidad necesaria de la distribución de la temperatura, la cual determina el número y la ubicación de los quemadores.

En el desarrollo de esta tesis utilizaremos diesel, ya que el combustible que en nuestro país se usa en instalaciones pequeñas y medianas, es así como la planta del poder del laboratorio de conversión de energía usa diesel por las siguientes ventajas principalmente; limpieza de funcionamiento, simplicidad del equipo y bajo costo de inversión y mantenimiento.

Las características del diesel que disponemos en el Ecuador están dadas en la tabla 11.

Los hornos para calentamiento se clasifican ordinariamente según: 1) el fin para el cual se calienta el material, 2) la naturaleza de la transmisión del calor al material, el modo como se calienta el horno; 4) el método de manipulación del material en el horno.

Primordialmente se le da una clasificación metalúrgica según que el horno sea proyectado para revenido, recocida, carburizado, cianurado, cementado, forjado, calentado para conformación o laminado, esmaltado o para algún otro fin.

Las variedades principales son horno de reverbero, en los cuales el calor de los productos de combustión es transmitido - al material calentado, con el que están en contacto directo, - por convección y radiación directa desde los gases calientes - del horno; Hornos de mufla, en los cuales el calor se transmite por conducción a través de una mufla metálica o refractaria que protege el material calentado de su contacto con los gases y es luego transmitido por radiación del interior de la mufla al material calentado, el cual está rodeado, a veces por gases inertes para impedir que tenga contacto con el aire; los hornos de baños líquidos, en los cuales se calienta una matriz metálica por su parte exterior o por inmersión. Esta matriz contiene - un medio líquido para calentamiento o para conseguir algún proceso que transmite el calor al material sumergido en él. Este tipo incluye los hornos de revenido a baja temperatura que usan aceite como medio de calentamiento, los hornos de templeado que utilizan un baño de plomo, los hornos de templeado y cianuración con baños de sales especiales y los hornos de galvanizado o estañado con zinc o estaño. Una forma importante de horno para - temperaturas bajas (menores de 650°C) es el de tipo de recirculación, en el cual el combustible es quemado en una cámara de - combustión externa y el producto de dicha combustión mezclado - con aire se hace circular rápidamente a través de la cámara de calentamiento.

Otra mejora importante de los hornos de mufla es el horno calentado por tubo mediante en el que el combustible es quemado en tubos metálicos que transmiten el calor a la carga por radiación. Se conoce aún otro desarrollo con el nombre de calentamiento de alta velocidad y emplea quemadores de mezcla previa, con características de combustión rápida, en agrupamiento ajustado para amoldarse al material calentado. Con la aplicación ajustada del calor radiado y una alta aportación de temperatura, se lleva a cabo un calentamiento muy rápido en aplicaciones especiales.

La clasificación según el modo de calentar el horno se aplica principalmente a los hornos de rebervero, e indica si el horno es calentado con fuego directo o en el interior del laboratorio. Por arriba, lateral o por abajo. La figura 3 ilustra esquemáticamente los principios de cada uno de estos tipos. El horno calentado por abajo es excelente para temperaturas bajas porque el material calentado queda protegido de las altas temperaturas del combustible ardiendo.

Las temperaturas y la atmósfera pueden regularse más fácilmente que en los demás tipos, pero la temperatura queda limitada, por la vida o duración de los refractarios a un valor máximo de unos  $980^{\circ}\text{C}$ . El tipo de horno calentado con fuego por arriba es de características semejantes al anterior, pero su ancho es limitado a unos 2 metros por la resistencia del arco perforado y en su altura alrededor de 1.20 metros por la dificultad de obtener uniformidad de temperatura, debido a la tendencia del calor a elevarse. El modelo de horno calentado con fuego lateral se emplea cuando la temperatura es demasiado alta para obtenerla calentando con fuego por debajo o cuando el calentamiento por abajo estaría el mejor método de manipulación y cuando se necesita una atmósfera mejor que la que se puede obtener con el calentamiento con fuego directo. Por encima de  $1100^{\circ}\text{C}$ , se utiliza casi siempre el principio del calentamiento mediante fuego directo.

En los del tipo de funcionamiento intermitente o por hornadas el material que ha de calentarse se carga dentro del horno y permanece en la misma posición hasta que se saca después de que ha calentado lo suficiente. En un horno contínuo el material se mueve a lo largo de él, por medios mecánicos que incluyen empujadores, transportadores de cadena, hogares con movimiento alternativo, hogares con rodillos, los hornos contínuos son dispositivos que ahorran principalmente mano de obra y pueden o no economizar combustible.

Entonces de acuerdo a la finalidad que perseguimos probar combustibles lo definiremos "para pruebas de combustibles", de rebervero por la forma de transmisión de calor hacia la carga, de designación que la omitimos ya que el objetivo principal no es el calentar una carga. La designación según el modo de calentar el horno sería de fuego directo, omitido también por la razón anterior. Finalmente por el método de manipulación correspondería a intermitente calificativo entredicho en la primera designación. Siendo entonces un horno para pruebas de combustibles.

## 1.4

## TIPO DE QUEMADORES

El aprovechamiento de los combustibles depende de la calidad de combustión del combustible, así entonces la buena combustión - depende del grado en que el combustible es mezclado con el comburente, siendo el comburente el oxígeno que puede ser tomado previamente directamente del aire o separado previamente a la combustión. En el primer caso la mezcla puede realizarse en forma natural a través de un mecanismo y a través de él, el oxígeno es usado en estado libre.

El mecanismo usado para preparar el combustible y mezclarlo con el comburente adecuadamente es conocido con el nombre de quemador, clasificándose a su vez de acuerdo al combustible en el que se utilice así quemador para combustible sólido, para combustible líquido y quemador para combustible gaseoso.

En el desarrollo de esta tesis utilizaremos un combustible líquido, por lo tanto nos referiremos a los quemadores para este tipo de combustible.

Los quemadores para combustible líquidos se clasifican:

- 1) por el método de preparar el combustible para la combustión
- 2) por el tipo de diseño.

Por el método de preparar el combustible para la combustión se clasifica a su vez en 1) atomizadores y 2) vaporizadores.

Los de atomización se clasifican en 1) de alta presión, 2) de baja presión y 3) atomizador por fuerza centrífuga.

Por el tipo de diseño se clasifican en 1) tipo cañón, 2) tipo rotativo y 3) tipo mecha.

El de tipo cañón puede ser 1) alta presión y 2) baja presión.

Los rotativos son: 1) horizontal, 2) llama de pared vertical y 3) llama de girasol vertical.

El tipo mecha será de 1) tipo natural y 2) tipo forzado.

Además de la clasificación anterior tenemos una clasificación secundaria que se basa en la capacidad del quemador:

- 1) Doméstico, si la capacidad no supera a los 5 galones por hora;
- 2) Comercial o Industrial, para capacidad de 5 a 150 galones por hora.

Para nosotros es necesario que el quemador sea sencillo, de rápido y cómodo encendido, además que tenga un consumo apropiado - correspondiendo en este caso a un quemador doméstico atomizado a alta presión, que es el tipo de quemador utilizado en la planta de generación de poder.

El quemador tipo cañón atomizado por alta presión, es un quemador sencillo que consta principalmente de una bomba, ventilador y atomizador.

Bomba que normalmente opera a 100 PSI. Atomizador con anillo de ESPRA<sup>®</sup> que puede ser 30°; 45°; 60° y 80°, con un tamaño de gotas de 0.0051 cm. a 0.0254 cm. de diámetro dándonos una superficie de alrededor de 4451604 cm<sup>2</sup> por galón.

## CAPITULO 2

## ANÁLISIS DE LOS PROCESOS TÉRMICOS REFERIDOS AL HORMO

## 2.1

## PROCESOS TÉRMICOS

La transferencia de calor es la ciencia que relaciona la razón de intercambio de calor entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas. La velocidad con que puede hacerse progresar el intercambio de calor, es independiente de la fuente y receptor, sin embargo es inherente a la temperatura y el medio.

El estudio de la transferencia de calor se facilita enormemente si se comprende la naturaleza del calor. Sin embargo esta es una ventaja que no es fácilmente disponible, ya que se han descubierto un sinnúmero de manifestaciones del calor, lo que ha impedido que una teoría simple lo cubra todo. Las leyes que son aplicadas a bajas temperaturas pueden no serlo a las temperaturas altas. Para propósitos de ingeniería es necesario comenzar el estudio con información básica a causa de unos cuantos fenómenos. Las fases de una sustancia simple están asociadas con el contenido de energía, la que es inversamente proporcional a la rigidez.

Para una misma sustancia en sus diferentes grados de energía (temperatura), sus propiedades térmicas tienen diferentes magnitudes. Además se conoce también que una fuente caliente es capaz de grandes excitaciones subatómicas a tal grado emite o transmite energía sin ningún contacto directo con el receptor. Cada tipo de intercambio tiene sus propias peculiaridades.

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor que son conducción, radiación y convección, aún cuando muchas de las aplicaciones prácticas en ingeniería son combinaciones de las dos o las tres formas.

## 2.1.1

CONDUCCION<sup>(1)\*</sup>

Los fundamentos de la conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuye generalmente a Fourier. En muchos sistemas que involucren flujo, tal como, flujo de calor, flujo de electricidad, etc., se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema.

En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a cabo por una diferencia de temperatura entre la superficie de temperatura caliente y fría. Entonces cuando dos superficies de una pared están a diferente temperatura, necesariamente existe un flujo y una resistencia al flujo de calor. La resistencia es la recíproca de la conductancia entonces el flujo es directamente proporcional a la conductancia y al potencial. Para hacer de esta relación una igualdad, la conductancia debe evaluarse de tal manera, que ambos lados sean dimensional y numéricamente correctos. Supongamos que una cantidad  $Q'$  (Cal) de calor es transmitida por una pared de tamaño conocido en un intervalo de tiempo  $\theta$  (horas) con una diferencia de temperatura media  $T^\circ\text{C}$  entonces podemos escribir en forma de ecuación la relación anterior:

$$Q = \frac{Q'}{\theta} = \text{Conductancia} \times T \quad \frac{\text{Cal}}{\text{h}}$$

y la conductancia tiene las dimensiones de  $\text{Cal}/\text{h}^\circ\text{C}$ . La conductancia es una propiedad ponderable de toda la pared, aún cuando se ha encontrado experimentalmente que el flujo de calor está independientemente influenciado por el grosor de la pared y su área. Es deseable diseñar una pared que tenga ciertas características respecto al flujo de calor, la conductancia no es útil, y es aplicable únicamente, en la pared experimental. Para permitir el uso más amplio a la in

(\*) El número entre paréntesis corresponde a la bibliografía.

formación experimental, se ha convenido reportar la conductancia únicamente cuando todas las dimensiones se refieren a valores unitarios. Cuando la conductancia es así expresada se conoce con el nombre de conductividad térmica expresada de la siguiente manera:

$$\text{Conductancia} = k \frac{A}{L}$$

4

$$Q = k \frac{A}{L} \Delta T$$

Donde A es el área y L el espesor de la pared, entonces k tiene las dimensiones resultantes de la expresión:

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \qquad \frac{\text{Cal} - \text{m}}{\text{h} - \text{m}^2 - ^\circ\text{C}}$$

La conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a la vez es mayor de la de los gases. Algunos sólidos tales como los metales tienen altas conductividades térmicas y se denominan conductores. Otros tienen bajas conductividades y son malos conductores del calor, estos son los aislantes. En la exposición anterior se supuso que la conductividad térmica es independiente de la temperatura en cualquier punto del material. Las conductividades de los sólidos pueden ya sea aumentar o disminuir con la temperatura, y en algunos casos puede hasta invertir su velocidad de cambio de una disminución a un aumento. La variación puede usualmente expresarse por la siguiente ecuación lineal:

$$k(T) = k_0 (1 + B_k T)$$

Donde  $k_0$  es la conductividad térmica a  $T = 0^\circ\text{K}$  y  $B_k$  es una constante llamada coeficiente por temperatura de la conductividad térmica, está disponible en forma de una curva que muestra como varía k con T, el coeficiente por temperatura puede obtenerse en forma aproxima-

da, trazando una línea recta entre las temperaturas de interés y midiendo su pendiente. De esta manera  $k_0$  es un valor hipotético de la conductividad térmica igual a la ordenada en la temperatura cero.

Con una aproximación lineal de la variación de la conductividad térmica con la temperatura, la rapidez de flujo de calor por conducción a través de una pared tenemos:

$$\frac{Q}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_c}^{T_f} k_0 (1 - \beta_k T) dT$$

Integrando la ecuación se obtiene:

$$Q = \frac{k_0 A}{L} \left[ T_c - T_f + \frac{\beta_k}{2} (T_c^2 - T_f^2) \right]$$

$$Q = \Delta T \frac{A}{L} k_m$$

Donde  $k_m$  representa un valor medio de la conductividad térmica. Por consiguiente para una variación lineal de  $k$  con  $T$ , la conductividad térmica debería ser evaluada a la media aritmética de la temperatura.

De la ecuación que describe el sentido del flujo de calor a través de una pared en estado estable. Es de interés cuando la pared consiste de varios materiales colocados juntos en serie, tal como en la construcción de un horno o cámara de combustión. Usualmente se emplean varios tipos de refractarios, puesto que aquellos que son capaces de resistir las altas temperaturas interiores son más frágiles y caros que aquellos que se requiere cerca de la superficie externa, donde las temperaturas son considerablemente menores. Refiriéndonos a la Fig. 4 de la pared lateral del horno que está formada de tres materiales indicados por los suscritos a, b y c. Para la pared total.

A través del material "a" debe vencer la resistencia  $R_a$ , pero al pasar a través del material "a" el calor también pasará a través de los materiales b y c en serie. El calor entrando en el lado caliente debe ser igual al calor que sale en la cara fría, puesto que el estado estable sanciona el almacenamiento de calor. Si  $R_a$ ,  $R_b$  y  $R_c$  son diferentes, como resultante de diferente conductividad y espesor, la razón de la diferencia de temperatura a través de cada capa a su resistencia, deberá ser la misma que la razón de la diferencia total de temperatura a la resistencia total.

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\Delta T_a}{R_a} = \frac{\Delta T_b}{R_b} = \frac{\Delta T_c}{R_c}$$

Donde:  $\Delta T_a = T_0 - T_1$

$$\Delta T_b = T_1 - T_2$$

$$\Delta T_c = T_2 - T_3$$

Entonces tenemos que

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_0 - T_3}{\frac{L_a}{k_a A} + \frac{L_b}{k_b A} + \frac{L_c}{k_c A}}$$

## 2.1.2

RADIACIÓN<sup>(1)</sup>

La transferencia de calor por radiación es solamente uno de los numerosos fenómenos electromagnéticos. La gama completa de tales ondas está dividida en clases de acuerdo con la longitud de onda o la frecuencia y también de acuerdo con la aplicación.

La verdadera naturaleza y mecanismo de transporte de la radiación no ha sido aún completamente establecida. Algunos fenómenos de la radiación pueden explicarse a través de la teoría ondulatoria y otros en términos de la teoría cuántica, pero ninguna de ellas explica completamente todas las observaciones experimentales. Sin embargo se sabe, que la radiación viaja en el vacío con la velocidad de la luz  $v$ , y que no requiere de ningún medio para su propagación. La transferencia de energía tiene lugar en forma de pequeñas pero finitas unidades de energía conocidas como cuantos. La frecuencia  $\nu$ , depende completamente de la naturaleza de su fuente, así como un cuerpo de cualquier clase a cualquier temperatura emite radiación térmica.

En el proceso de radiación, un cuerpo convierte parte de su energía interna en ondas electromagnéticas, que constituyen una forma de la energía. Estas ondas se mueven a través del espacio hasta que chocan con otro cuerpo, donde una parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna. La emisión de radiación ocasiona un decremento en la energía interna del cuerpo emisor, y a menos que el calor se genere dentro del cuerpo como en el caso del sol o que reciba de otra fuente, su temperatura decrecerá. Su temperatura permanecerá constante sólo si la velocidad con que genera o recibe calor sea igual a la velocidad con que emite energía.

Todos los cuerpos emiten radiación continuamente, a la que estamos expuestos en todo momento. Sin embargo la radiación con longitudes de onda de 0.1 a 100  $\mu$  ocasionan calentamiento apreciable del cuerpo receptor, que para propósitos prácticos, la radiación de importancia en los cálculos de transferencia de calor es el rango mencionado previamente.

La radiación térmica que proviene de la superficie de un sólido se expresa mejor, para fines de ingeniería, por su relación a la radiación de un elemento llamado radiador ideal o cuerpo negro. Las propiedades características de un cuerpo negro son que absorbe todas las radiaciones que inciden, sin reflejar, transmitir ni dispersar ninguna que la calidad y la cantidad de la radiación que emite quedan completamente determinadas por su temperatura, produciendo un aumento de esta un incremento tanto en la radiación total como en la fracción emitida en la región de las ondas cortas del espectro. La radiación total,  $Q$ , procedente de una superficie negra de área  $A$  y temperatura absoluta  $T$  está expresada por la ley de Stefan Boltzmann.

$$Q = \sigma A T^4$$

La constante  $\sigma$  se conoce como constante de Stefan Boltzmann y tiene el valor de  $4.93 \times 10^{-8} \text{ Cal/} \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2 \text{ K}^4}$

La relación de la potencia total radiante de la superficie que no es negra a la de una negra que se encuentra a la misma temperatura se llama emisividad de la superficie y se designa por  $\epsilon$ . Con más propiedad el término es emisividad hemisférica total para diferenciarlo de 1) la emisividad monocromática  $\epsilon_\lambda$  que es la relación de las potencias radiantes a la longitud de onda  $\lambda$  y de 2) la emisividad directa  $\epsilon_\theta$  que es la relación de las potencias radiantes en una dirección que forma un ángulo  $\theta$  con la normal a la superficie. Debido al hecho de que la radiación que proviene de la superficie de un-

cuerpo que no es negro se origina dentro del volumen del cuerpo, existe cierta ambigüedad en la definición anterior de emisividad cuando hay un gradiente o variación proporcional de temperatura en la superficie y en la normal a ella, sin embargo, los conductores metálicos son tan opacos a la radiación que solo una porción despreciable de aquella que proviene de su superficie se origina a más de  $25 \times 10^8$  cm.

Dentro de su parte interior, y la mayoría de los no conductores tienen una emisión despreciable desde unos cuantos centésimos de centímetros por debajo de su superficie. Cuando intervienen las contadas excepciones por ejemplo el tratamiento de los gases no luminosos, deben tomarse como si fueran de radiación procedente de un volumen, y es necesario conocer su coeficiente de absorción en función de la longitud de onda. La emisividad de una superficie varía con la temperatura, su grado de rugosidad, y, si es metálica, su grado de oxidación. La tabla 12 da las emisividades de varias superficies. Aunque los valores de la tabla se aplican estrictamente a la radiación normal procedente de la superficie, puede usarse con un error despreciable para emisividad hemisférica, excepto en el caso de superficies metálicas pulidas para las cuales la emisividad hemisférica es de 15 a 20% superior a la emisividad normal.

El coeficiente de absorción o absorbidad,  $\alpha$ , de una superficie depende los mismos factores que afectan a la emisividad, además de la calidad de la radiación incidente, determinada completamente por la temperatura del radiador si este es negro. Se puede asignar dos subíndices a  $\alpha$ , el primero para indicar la temperatura del receptor y el segundo la de la radiación incidente. El coeficiente de absorción de los cuerpos no conductores de la electricidad disminuye notablemente aunque de una manera irregular al aumentar la temperatura de la radiación incidente y es relativamente insensible a los cambios de temperatura de la superficie. El coeficiente de absorción de los conductores metálicos, por otra parte, aumentan aproximadamente en re

lación lineal con la raíz cuadrada del producto de la temperatura de la superficie. La figura 5 ilustra el efecto, de la temperatura de la radiación incidente sobre la absorvidad o absorbilidad de las superficies de varios metales de construcción, la mayoría de ellos no-metálicos, a la temperatura ambiente.

Si la emisividad monocromática de una superficie no cambia con la longitud de onda, se dice que la superficie es gris. El coeficiente de absorción de una superficie gris es independiente de la temperatura de la radiación incidente e igual a la emisividad de la superficie.

Se ha demostrado que la absorbilidad  $\alpha_{1,2}$  de un conductor metálico es igual a su absorbilidad  $\alpha_{mm}$  ( $= E_m$ ), evaluada a la temperatura media  $T_m$  igual a la media geométrica de  $T_1$  y  $T_2$ .

Para cuerpos opacos, la reflexibilidad es el complemento de la absorbilidad.

La pérdida neta de energía por radiación que sufre un cuerpo que está a la temperatura  $T$ , en medios circunadnates negros a  $T_2$  está expresada por

$$Q_{j\text{ neta}} = 4.93 A_1 \left[ \epsilon_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \alpha_{1,2} \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Si  $T_2$  difiere poco a  $T_1$  y  $\alpha_{1,2} = \epsilon_1 (T_2/T_1)^n$  donde  $n$  se deduce de la figura 5, la ecuación anterior se convierte:

$$Q_{j\text{ neta}} = 4.93 A_1 m \left( 1 + \frac{n}{4} \right) \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Para las superficies grises,  $\alpha_{1,2} = \epsilon_1 = \epsilon_2$  y  $n = 0$

El caso más complicado y a la vez el más importante de intercambio de radiación en un sistema de varias superficies que se encuentran a temperaturas diferentes y son de emisividades distintas com-

prende la evaluación de un factor geométrico  $F$ . Se define  $F_{12}$  por la fracción de la radiación que saliendo de la superficie  $A_1$ , en todas direcciones es interceptada por la superficie  $A_2$ . Los valores de  $F$  han sido calculados para varias disposiciones de superficies sobre la hipótesis de que la emisividad  $\epsilon_0$  es constante e independiente de  $\theta$ . Esto es exacto para superficies negras y bastante bueno para la mayoría de las superficies no metálicas, mates, o las metálicas ásperas. Los valores de  $F$  para rectángulos y discos paralelos y opuestos de igual tamaño son dados por la figura 6, para rectángulos perpendiculares adyacentes por la figura 7. Para un plano infinito paralelo a un sistema de filas de tubos paralelos por la figura 8 y 9. Algunos conceptos útiles e importantes para la evaluación de los  $F$  son que  $A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$ ; que  $F_{1-1} + F_{1-2} + F_{1-3} + \dots = 1$ ; que por supuesto,  $F_{1-1} = 0$  cuando  $A_1$  no puede ver parte alguna de si misma.

En un recinto cerrado por superficies negras, el flujo neto de calor procedente de  $A_1$  está entonces expresado por

$$Q_{1 \text{ neto}} = \sigma \left[ (A_1 F_{1-2} T_1^4 - A_2 F_{2-1} T_2^4) + (A_1 F_{1-3} T_1^4 - A_3 F_{3-1} T_3^4) + \dots \right]$$

$$= \sigma A_1 T_1^4 - \left( F_{2-1} A_2 T_2^4 + A_3 F_{3-1} T_3^4 + \dots \right) \sigma$$

Considerese un recinto cerrado que conste en parte de fuentes caloríficas negras y sumideros o eliminadores de calor  $A_1, A_2, A_3, \dots$  y en parte de superficies refractarias  $A_R, A_S, \dots$  a partir de las cuales no hay flujo neto de radiación calorífica (lo que satisface la pared refractaria media en que la diferencia entre la convección interna es muy pequeña comparada con la radiación incidente). Las temperaturas de la superficie del refractario puede eliminarse por balance térmico, los cuales dan una ecuación que expresa el flujo neto  $Q_{1-2}$  de  $A_1$  a  $A_2$  por los mecanismos combinados de radiación directa más rerradiación procedente de las superficies refractarias.

$$Q_{1-2} = A_1 F_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = A_2 F_{2-1} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

El factor  $F$  se conoce exactamente por unos cuantos casos geométricamente simples y puede conocerse aproximadamente para otros. Si  $A_1$  y  $A_2$  son discos, cuadrados o rectángulos iguales y paralelos, conectados por paredes refractarias no conductoras pero sí irradiantes, entonces  $F$  está dado por la figura 6. Si  $A_1$  representa un plano infinito y  $A_2$  una o dos filas de tubos paralelos infinitos situados en un plano paralelo, y si la otra única superficie es refractaria y se encuentra detrás de los tubos,  $F_{1-2}$  está dada por la figura 8. Si un recinto cerrado puede ser dividido en varias fuentes, sumideros de calor radiado  $A_1, A_2$ , etc. y el resto del recinto (superficie refractaria rerradiante) puede ser considerado en conjunto como  $A_R$  a una temperatura uniforme  $T_R$  entonces el factor  $F_{1-2}$  está dado en función de los factores geométricos más simples  $F$  por la expresión.

$$\bar{F}_{1-2} = F_{1-2} + \frac{F_{1-R} F_{R-2}}{1 - F_{R-R}}$$

Si este caso se simplifica más aún considerando que las únicas superficies no refractarias presentes en el sistema son la fuente de calor  $A_1$ , y el sumidero de calor  $A_2$  y que cada una de estas no puede ver parte alguna de sí misma, es decir, que no tiene curvatura negativa, la expresión anterior se reduce a

$$\bar{F}_{1-2} = (A_2 - A_1 F_{1-2}^2) / (A_1 + A_2 - 2 A_1 F_{1-2})$$

La cual no necesita más que la evaluación de un factor geométrico  $F$ . Este caso cubre una fracción mayor de problemas de intercambio de energía radiada entre la fuente y el sumidero en el recinto de un horno, y solo cae en error en el punto en que la suposición de temperatura uniforme en el refractario no sea verdad. Se conocen expresiones más complicadas que permiten aproximarse a la respuesta exacta con cualquier grado de exactitud deseado, dependiendo del número de zonas en las que se divida el refractario.

La discrepancia precisa por el apartamiento de las superficies de las características de radiación negras o ideales es en general demasiado complicada para ser usada en ingeniería. Sin embargo, si se permite la suposición de que todas las superficies son grises, se le puede dar a este asunto un tratamiento adecuado. Si se deja la nomenclatura como para  $F$ , excepto en que  $A_1, A_2$ , etc., sean ahora las superficies de emisividades  $E_1, E_2$ , etc. Se encuentra que el intercambio neto de radiación entre  $A_1$  y  $A_2$ , debido ahora a los mecanismos combinados de radiación directa, rerradiación desde la superficie refractarias y reflexión múltiple dentro del recinto la discrepancia se puede expresar en la forma:

$$Q_{1-2} = A_1 \int_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \equiv A_2 \int_{2-1} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Justamente como el factor  $\bar{F}$  pudo evaluarse a partir de  $F$ , también el factor  $\mathcal{F}$  puede evaluarse a partir de  $F$ . Para el caso de dos superficies no refractarias  $A_1$  y  $A_2$  y cualquier número de zonas refractarias.

$$\mathcal{F}_{1-2} = \left[ (\bar{\epsilon}_1^{-1} - 1) + F_{1-2}^{-1} + (A_1/A_2) (\bar{\epsilon}_2^{-1} - 1) \right]^{-1}$$

Debe observarse que la emisividad de las superficies refractarias que forman el sistema no es un factor, es decir que no tiene influencia alguna el que una superficie refractaria mantenga su equilibrio por absorción completa y por rerradiación de cuerpo negro o por reflexión completa y nada de radiación.

Como en el caso de  $\bar{F}$ ,  $\mathcal{F}$  puede evaluarse con cualquier grado de seado de exactitud, dividiendo el sistema en un número suficiente de zonas, pero la mayoría de los problemas de hornos no justifican el ir más allá de la expresión dada arriba.

La radiación de una llama debe a los productos gaseosos calien -

tes de la combustión y a veces también de las partículas incandescentes de dimensiones microscópicas y submicroscópicas, de las partículas de carbón, cenizas o su mezcla, que están suspendidas en los gases calientes.

La luminosidad del hollín es importante cuando la combustión tiene lugar bajo condiciones tales que los gases de hidrocarburos de la llama son sometidos a un calentamiento en ausencia de la suficiente cantidad de aire, produciéndose una descomposición térmica. Por el momento, no hay ningún método para predecir la luminosidad de una llama analíticamente se tiene que confiar en las mediciones experimentales de llamas semejantes a las que interesen. Debemos anotar que la observación visual es una base deficiente de juicio, una llama tan brillante que no deje ver nada detrás de ella, puede, obstante, estar lejos de ser un cuerpo negro en sus características de radiación. La radiación de tal llama puede estimarse por mediciones, efectuadas con un radiómetro que mide la radiación incidente sobre una superficie.

La radiación de la envolvente de una nube de partículas opacas es equivalente a la de una superficie de área igual a la de la envoltura y de emisividad  $1 - C$ , en donde  $C$  es el número de partículas por unidad de volumen del gas,  $a$  es el área proyectada de ellas, y  $L$  es la longitud de la trayectoria media a través de la nube (véase la tabla 1). La emisividad de una llama de carbón mineral pulverizado es materialmente más alta, debido a la luminosidad adicional debida a la descomposición térmica de los hidrocarburos que hay en aquella.

De máxima importancia en la transmisión de calor radiante procedente de llamas, es la radiación infrarroja de los productos de la combustión, vapor de agua y anhídrido carbónico, que proyectan sombras de convección a las temperaturas de los hornos. Si una radiación de cuerpo negro pasa a través de uno cualquiera de estos dos ga

ses , se produce absorción a ciertas longitudes de onda. Inversamente, si se calientan estos gases, emiten radiaciones cerca de aquellas mismas longitudes de onda. Considerese una masa hemisférica de gas de radio  $L$  que contenga anhídrido carbónico de presión parcial  $P_c$ , y supongamos que se quiere evaluar el intercambio de calor radiante entre el gas a la temperatura  $T_g$  y un elemento de superficie a la temperatura  $T_s$ , situado en el centro de la base del hemisferio. Por unidad de superficie, la emisividad del gas a la superficie es  $\int T_g^4 \mathcal{E}_g$ , en donde  $\mathcal{E}_g$  designa la emisividad del gas. Para el anhídrido carbónico,  $\mathcal{E}_g$  depende de  $T_g$ , la presión total y el término  $P_c L$  se encuentra en la figura 10, la cual se aplica para el caso ordinario de presión total constante a una atmósfera. La absorción, efectuada por el gas, de la radiación procedente de la superficie es  $\int \alpha_g T_s^4$  en donde  $\alpha_g$  es la absorbilidad del gas para la radiación de cuerpo negro procedente de la superficie. Aproximadamente  $\alpha_g$  se obtiene por medio del diagrama de emisividad del gas en el mismo valor de  $P_c L$  como antes, pero a la temperatura  $T_s$  en vez de  $T_g$ . Tal aproximación es adecuada si el gas está más caliente que la superficie y el término de absorción conserva en consecuencia una importancia secundaria. Si se trata en el caso inverso, se puede obtener un valor exacto de  $\alpha_g$  si se lee una emisividad en la figura 10 a  $T_s$  como antes, pero a  $P_c L (T_s/T_g)$  en vez de  $P_c L$  y luego se multiplica el resultado por  $(T_g/T_s)^{0.65}$ . Si la presión total obra sobre el gas difiere de una atmósfera, la emisividad y el coeficiente de absorción son multiplicados cada uno por un factor  $C_c$  leído en la figura 11.

Para el vapor de agua, la emisividad del gas depende de  $T_g$  y  $P_w L$  y de la presión total  $P_t$  como antes, y además de la presión parcial del vapor de agua,  $P_w$ . La emisividad debida al vapor de agua se da en la figura 12 en función de  $T_g$  y de  $P_w L$ , para el caso especial de  $P_w = 0$  y  $P_r = 1$ . Se tiene en cuenta la discrepancia por el apartamiento de estas condiciones especiales, multiplicando  $\mathcal{E}_g$  tomada de la figura 12.

Por un factor  $C_w$  leído en la figura 13 en función de  $(P_w+P_r)$  y de  $P_wL$ . El coeficiente de absorción del vapor de agua por la radiación de un cuerpo negro puede obtenerse como la del anhídrido carbónico. Aproximadamente  $\alpha_g$  es  $\epsilon_g$  leído a  $P_wL$  y  $T_s$  en vez de  $T_g$ , más exactamente, es la emisividad tomada de la figura 12, leída a  $T_s$  y a  $P_wL (T_s/T_g)$  en vez de  $P_wL$ , y luego multiplicada por  $(T_g/T_s)^{0.45}$ .

El factor de corrección  $C_w$  sigue aplicándose aún. Cuando el anhídrido carbónico y el vapor de agua están presentes juntos, la radiación total debida a ambos es un poco menos que la suma de los efectos calculados independientemente, porque cada gas es un tanto opaco a la radiación procedente del otro. La cantidad  $\Delta\epsilon$ , en la que hay que deducir la suma de  $\epsilon_g$  para  $CO_2$  y  $\epsilon_g$  para  $H_2O$  (evaluada como si el otro estuviera presente) para obtener la  $\alpha_g$  debida a los dos juntos, se lee en la figura 14. El mismo tipo de corrección se aplica al calcular  $\alpha_g$ .

La formulación del intercambio de energía radiada entre un gas y su superficie circundante, cuando el gas contiene  $CO_2$  y  $H_2O$  es entonces:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{A} &= \sigma \epsilon'_s (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \\ &= 4.93 \epsilon'_s \left[ \epsilon_g \left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \alpha_g \left(\frac{T_s}{100}\right)^4 \right] \end{aligned}$$

Si la superficie es gris, la multiplicación por  $\epsilon'_s$  tiene en cuenta la discrepancia adecuada por la reducción del rayo primario desde el gas a la superficie y de esta al gas, respectivamente, pero algo de la radiación de gas inicialmente reflejado desde la superficie tiene una oportunidad ulterior de absorción en la superficie porque el gas no es un incompletamente opaco al rayo reflejado.

Consecuentemente, el factor de discrepancia por la emisividad entre  $\epsilon'_s$  y la unidad, y más cercano a la última cuanto más transparente sea el gas (bajo DL), más vuelta sobre sí misma la superficie. En

el intervalo de emisividad de la mayoría de las superficies, 0,1 a 1, una aproximación adecuada consiste, en el empleo de una emisividad,  $\epsilon_s$ , de un valor medio entre el real y la unidad.

La expresión anterior se formuló para el caso de intercambio entre una masa hemisférica de gas y un punto o pequeña región situada sobre su base, es decir, para el caso en el cual la longitud de la trayectoria,  $L$ , del rayo radiado sea igual en todas direcciones. Para formas gaseosas de importancia industrial, se ha visto que cualquiera de ellas es representable aproximadamente por un hemisferio equivalente de radio apropiado o sea, que hay una longitud media de rayo que pueda ser utilizada para evaluar emisividades y corrientes de absorción de gases por medio de las figuras 10 y 12. A medida que  $PL$  se aproxima a cero, la longitud media del rayo se aproxima como límite, al valor de 4 veces la relación del volumen del gas al área circundante. Para el intervalo de  $PL$  encontrado en la práctica  $L$  es siempre menor; 85% del valor límite es por lo general una aproximación satisfactoria. La tabla 13 hace un resumen de las recomendaciones.

Si la radiación del gas tiene lugar en un espacio en el que hay un cambio continuo de las temperaturas del gas y de la superficie de un extremo a otro del intercambiador, se puede hallar la discrepancia exacta por integración gráfica convencional. Se puede obtener una aproximación regular usando una temperatura media de la superficie igual a la media aritmética, y una temperatura media del gas igual a la de la temperatura media de la superficie más la media logarítmica de la diferencia de temperaturas, del gas a la superficie, en los dos extremos.

$$T_{sm} = \frac{1}{2} (T_{s1} + T_{s2})$$

$$T_{gm} = T_{sm} + \frac{(T_{g1} - T_{s1}) - (T_{g2} - T_{s2})}{2.3 \log \frac{(T_{g1} - T_{s1})}{(T_{g2} - T_{s2})}}$$

La llamada sección radiante de un horno presenta un problema de transmisión térmica en el que entran la acción combinada de radiación directa de la llama al sumidero o al materia que se calienta o eliminador de calor, la radiación de la llama a las superficies refractarias para desde estas volver a través de aquella (con absorción parcial) al sumidero, la convección y las pérdidas externas, se puede resolver un problema de tal naturaleza si se aceptan las hipótesis siguientes: 1) pérdidas externas desde las paredes refractarias iguales a la convección y radiación desde la llama al refractario; 2) La llama es gris y tiene una emisividad  $\epsilon_{\delta}$  (definida con adiciones adecuadas por luminocidad del hollín, etc.); 3) todas las superficies refractarias tienen una temperatura media común; 4) se puede asignar una temperatura media  $T_{\delta}$  a la llama y a los productos de combustión presentes en la cámara; 5) el sumidero de calor o receptor último tiene una temperatura uniforme en su superficie,  $T_c$ , y es gris, con emisividad  $\epsilon_c$  y área  $A_c$ . La resolución del problema, dando el régimen o flujo neto de transmisión de calor,  $Q_{\delta}$ , procedente de la llama por todos los mecanismos, es

$$Q_{\delta} = \epsilon_{\delta} A_c F_{c\delta} (T_{\delta}^4 - T_c^4) + h_c A_c (T_{\delta} - T_c) + u_r A_r (T_r - T)$$

en la cual

$$F_{c\delta} = [F_{\delta c}^{-1} + \epsilon_c - 1]^{-1}$$

$$F_{\delta c} = \epsilon_{\delta} \left[ 1 + \frac{A_r/A_c}{\epsilon_{\delta}/(1-\epsilon_{\delta})} F_{rc} \right]$$

$$u_r = \frac{1}{\frac{1}{h_r} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{h_0}}$$

En estas fórmulas,  $h_c$ ,  $h_r$  y  $h_o$  representan los coeficientes de convección en el sumidero, dentro del refractario, exteriormente a las superficies refractarias, respectivamente;  $L$  y  $K$  son el espesor de los tabiques y la conductividad térmica del refractario,  $T_{oo}$  es la temperatura del aire exterior,  $A_c$  difiere de  $A_r$  en que excluye la superficie fría ó área del último receptor, la cual aunque viendo la llama y recibiendo radiación no recibe calor por convección de los gases hasta que estos dejen la cámara.

Debe observarse que, como en el caso de la radiación en un recinto cerrado que no contengan gases radiantes ni absorbentes, está formado de  $F$  y  $\epsilon_c$ , y  $F$  de  $F$ ; pero aquí interviene la emisividad de la llama  $\epsilon_f$ . Se puede hacer alguna simplificación si se reemplaza el factor  $Frc$  (la fracción de la radiación que sale de las superficies refractarias, la cual es dirigida hacia la superficie fría o sumidero de calor) por  $A_c/(A_r + A_c)$  una aproximación regular cuando el refractario y las superficies frías no están completamente segregadas una de otra. Entonces:

$$Q_f = \sigma (T_f^4 - T_c^4) A_c \left[ \frac{1}{\epsilon_c} + \frac{A_c}{A_r} \frac{1}{A_c} \left( \frac{1}{\epsilon_f} - 1 \right) \right]^{-1} \\ + h_c A'_c (T_f - T_c) + u_r A_r (T_f - T_a)$$

La deducción de estas ecuaciones se basó sobre la suposición de que  $A_c$  estaba compuesta de superficies planas. Si en vez de esto, es una hilera de tubos montados en frente de una pared refractaria. El valor de  $A_c$  en el término de radiación de las ecuaciones anteriores es el plano continuo  $A_p$  en el que están situados los tubos, multiplicado por el factor apropiado,  $F$ , para tubos con respaldo refractario la superficie  $A_r$  debe ser aumentada en la cantidad  $(1-F) A_p$ .

## 2.1.3

CONVECCION<sup>(2)</sup>

La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. La convección tiene gran importancia como mecanismo de transmisión de energía entre superficie sólida y un fluido que puede ser líquido o gas.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la de un fluido que lo rodea se realiza en varias etapas. Primero, el calor fluirá por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes del fluido. El flujo en este caso, es de fluido y de energía. Realmente la energía es almacenada en las partículas del fluido y transportadas como resultado del movimiento de masa. Para su operación este mecanismo no depende inicialmente de la diferencia de temperatura por lo tanto, no está estrictamente de acuerdo con la definición de transferencia de calor. Sin embargo, el efecto neto es un transporte de energía y puesto que esto ocurre en la dirección de un gradiente de temperatura, está clasificado como un modo de transferencia de calor y conocido como flujo de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo por la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura, se habla de convección natural o convección libre. Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como un agitador, el proceso se conoce como convección forzada.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido. Como consecuencia

cia, un estudio de la transferencia del calor por convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

En la solución de problemas de transferencia de calor, es necesario, además de conocer los modos de transferencia de calor que juega un papel importante en el proceso, determinar si ese proceso es ó no estable. Cuando la rapidez del flujo de calor es un sistema no varía con el tiempo la temperatura de cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones del estado estable bajo las condiciones del estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema, debe ser igual a la rapidez con la que entra dicho flujo y no puede tener lugar ningún cambio de energía interna.

La mayoría de los problemas de transferencia de calor en la ingeniería está relacionado con sistemas en estado estable.

Así el flujo de calor procedente de los productos de combustión hacia la carga ( tubos de agua ).

El flujo de calor de un sistema es transitorio o inestable, cuando las temperaturas de varios puntos del sistema cambia con el tiempo. Puesto que un cambio de la temperatura indica un cambio de la energía interna, se concluye que una parte de la energía se almacena y la otra constituye un flujo de calor inestable. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable y con frecuencia pueden resolverse únicamente por métodos aproximados. Los problemas de Flujo de calor en estado inestable, se presentan durante el calentamiento de hornos, etc., o en tratamiento térmico.

La evaluación de la transferencia de calor por convección en la frontera entre un sólido y un fluido, por medio de la ecuación

$$Q_h = \bar{h}_c A (T_s - T_o)$$

La ecuación en esta forma, parece muy simple. Sin embargo la simplicidad es engañosa porque la ecuación es una definición de la unidad de conductancia térmica promedio a la convección  $\bar{h}_c$  y no una ley de transferencia de calor por convección. El coeficiente de transferencia de calor por convección es realmente una función complicada del flujo del fluido, y de las propiedades térmicas del medio fluido de la Geometría del Sistema. Su valor numérico en general no es uniforme sobre una superficie depende también del lugar donde se divide la temperatura del fluido.

Para la aplicación de la ecuación que evalúa el flujo de calor por convección se investigara la influencia de las condiciones del flujo., las propiedades del fluido y las formas geométricas de las fronteras para de acuerdo a las circunstancias hacer uso de las ecuaciones empíricas, tablas, gráficos que representan condiciones experimentales que facilitan la evaluación del coeficiente de transferencia de calor por convección  $\bar{h}_c$ .

En el caso de convección forzada en flujo turbulento sobre una superficie plana podemos aplicar la ecuación empírica.

$$\bar{h}_c = 0.036 \frac{k}{L} P_r^{1/3} \left( R_{eL}^{0.8} - 23200 \right)$$

Pero si se trata de flujo laminar sobre una placa plana la ecuación sera.

$$\bar{h}_c = 0.664 \frac{k}{L} Pr^{1/3} (ReL^{0.5})$$

Eckert y Soehnghen en investigaciones hechas a cerca del coeficiente convectivo en convección libre sobre superficies planas y cilindros verticales observaron que se mantenía una capa laminar hasta una altura de 20" a partir del borde de ataque. Notese que el gradiente de temperatura disminuye conforme se aleja del borde de ataque. Estos resultados fueron analizados por Schmidt y Beckman, para aire con número de Prandtl 0.74 se obtuvo la ecuación ( Referencia, Frank Kreith ).

$$\bar{h}_c = 0.48 \frac{k}{L} (GrL)^{1/4}$$

y para Prandtl diferente de 0.74 tenemos

$$\bar{h}_c = 0.508 \frac{k}{L} \left( \frac{Pr}{0.952 + Pr} GrL \right)^{1/4}$$

Sin embargo el comportamiento en superficies horizontales es ligeramente diferente, entonces

$$\bar{h}_c = 0.14 \frac{k}{L} (GrL Pr)^{1/3}$$

Para placas cuadradas con la superficie caliente hacia arriba en flujo con número de Gr de  $2 \times 10^7$  a  $3 \times 10^{10}$  y

$$\bar{h}_c = 0.54 \frac{k}{L} (GrL Pr)^{1/4}$$

Para los números de Gr de  $10^5$  a  $2 \times 10^7$  y

$$\bar{h}_c = 0.27 \frac{k}{L} (GrL Pr)^{1/4}$$

Para cuando Gr es de  $3 \times 10^5$  a  $3 \times 10^{10}$

Kays y London concluyeron estudios relacionados con el coeficiente de convección forzada dentro de tubos largos para flujo turbulento obteniendo.

$$St Pr^{2/3} = C Re^{-0.2} \left( \frac{T_b}{T_s} \right)^n$$

Donde  $C = 0.020$  para temperatura constante del ducto y  $C = 0.021$  para entrada constante de calor con  $n = 0.575$  para gases de calefacción y  $n = 0.15$  para gases de refrigeración de donde obtenemos

$$\bar{h}_c = St C_p V$$

El análisis se refiere a tubos largos pues para tubos cortos haremos la siguiente corrección.

$$\frac{\bar{h}_{cL}}{\bar{h}_c} = 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{0.7} \quad \text{Para } 2 < \frac{L}{D} < 20$$

Hilpert después de medir exactamente el coeficiente convectivo para el aire fluyendo sobre cilindros se obtuvo la siguiente relación.

$$\bar{h}_c = \frac{K}{D_o} C \left( \frac{V_{\infty} D_o}{\nu_f} \right)^n$$

Donde los coeficientes para diferentes condiciones se dan en la tabla 14 como podemos darnos cuenta el análisis se refiere al caso de que el flujo exista solo un tubo, pero es te generalmente no es el caso único y es necesario determinar el coeficiente convectivo para cuando exista en el flujo más de un tubo, los que pueden estar bajo dos formas de arreglos, en línea o en forma escalonada entonces

$$\bar{N}_u = \frac{\bar{h}_c D_o}{k_f} = 0.33 C_h \left( \frac{G_{max} D_o}{\mu_b} \right)^m P_r^{1/3}$$

o'

$$J = \frac{\bar{h}_c}{C_p G_{max}} P_{rb}^{2/3} \left( \frac{u_s}{u_b} \right)^{0.14} = \phi \left( \frac{G_{max} D_o}{\mu_b} \right)$$

Utilizando la primera para flujo turbulento y la segunda para laminar y de transición.

En el cálculo de hornos, la transferencia de calor por radiación y convección combinados que tiene lugar especialmente en las paredes es muy conveniente expresar lo en términos de un coeficiente convectivo común, y para ello es necesario definir el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_r$  como

$$\bar{h}_r = F_{1-2} \left[ \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \right]$$

En la que  $T_2'$  puede escogerse igual a  $T_2$  ó a cualquier temperatura convectiva del sistema. De esta manera tenemos un coeficiente combinado

$$\bar{h} = \bar{h}_c + \bar{h}_r$$

Si  $T_2' = T_2$ , el parentesis rectangular de la ecuación que define  $\bar{h}_r$ , se conoce como factor de temperatura  $F_T$ , y

$$\bar{h}_r = f_{1-2} F_T$$

En la figura 15 se dan valores de  $F_T$ .

En el caso de un horno podemos considerar como si se trata de un cuerpo gris encerrado en una envolvente o CUBIERTA negra, entonces podemos decir  $A_1 \tau_{1-2} = A_1 \epsilon_1$  esto quiere decir.

$$\bar{h}_r = \epsilon_1 F_T$$

y  $\epsilon_1$  lo determinamos en la forma analizada anteriormente. En el caso de hornos la evaluación del coeficiente convectivo es complejo dado a la gran turbulencia efectiva que existe en su interior, dando un coeficiente convectivo superior al obtenido de acuerdo al tipo de flujo que se obtiene a partir del flujo de gas que existe, por lo tanto es de uso común agregar un % al coeficiente convectivo total obtenido a partir del análisis teórico.

Generalmente el flujo que existe en un horno corresponde a uno laminar, por lo tanto se aplica la siguiente ecuación.

$$\bar{h}_c = 0.664 \frac{k}{L} P_r^{1/3} R_{eL}^{1/2} \left( \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F} \right)$$

$$\frac{K \text{ Cal}}{h \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C} = 4.88 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ F}$$

En el diseño de todo tipo de horno es importante conocer el período transiente tanto de calentamiento como de enfriamiento.

Como se mencionó anteriormente estado transiente es aquel durante el cual la temperatura de cualquier punto del sistema cambia con el tiempo, pues esto quiere decir que existe entonces un flujo de calor variable, comúnmente conocido como calor transiente a la que se convierte en energía interna. Pero lo más importante es = el tiempo de duración del estado transiente que es una función del material y su geometría. En el caso de hornos el período transiente se refiere a las paredes esto es desde el punto de vista ingenieril es el tiempo que tarda las paredes en alcanzar el 80% de la temperatura para un tiempo infinito.

Como se dijo anteriormente existen algunos métodos aproximados, pero el de uso frecuente es el método gráfico

co de Schmidt que consiste, primero se divide la pared en capas de grueso  $A x$  cada una, la sección transversal entre capas se designan por números enteros. Después se sustituye la curva continua dada para un ítempo cero por líneas rectas cortas entre planos seccionales, con pendiente aproximadamente igual al del Gradiente de temperatura en el centro de la capa. Con esto en mente y sabiendo que se debe cumplir.

$$\frac{C_p \Delta x^2}{K \Delta \theta} = 2$$

Con esta relación limitamos el espesor de la capa  $Ax$  en función de  $A \theta$ . Para el caso de la intervención del medio, se debe tener en cuenta la relación.

$$\frac{k}{h}$$

Con lo cual sustituimos por la influencia del medio. Para mayor información remitase a principios de transferencia de calor por FRANK KREITH Página 176. La evaluación del ítempo transiente lo haremos posteriormente luego de haber encontrado el espesor óptimo de la pared

## CAPITULO 3

## DISEÑO DEL TUNEL DE PRUEBAS

## 3.1 DETERMINACION DE LA FORMA

La forma de un horno es <sup>de</sup>terminada de acuerdo a ciertos factores :

- 1) Tipo de carga o finalidad del horno.
- 2) Tipo de combustible.
- 3) Disponibilidad de materiales de construcción (recursos)

Un horno experimental tiene el objeto comprobar o investigar condiciones reales de un horno industrial, determinadas por cierto combustible. Generalmente en la industria la carga de un horno esta soportada por una bateria de quemadores colocados así para obtener una distribución de temperaturas apropiadas.

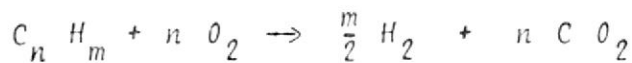
Para hacer un analisis es conveniente obtener un modelo representativo. Para lo cual como criterio ingenieril tomamos por modelo una celda, que es la zona influida o afectada por un quemador.

Como se estableció cada combustible tiene sus características propias, y de acuerdo a ello las características de combustión como son la velocidad característica de cada combustible como se manifiesta anteriormente, el tiempo de combustión que son factores determinantes de la longitud de la llama ó penetración con lo cual podemos determinar la profundidad mínima de la cámara de combustión que según el criterio de BRAGG la profundidad de la cámara de combustión debe ser como mínimo tres veces la lon-

gitud de la llama.

La longitud de llama como se dijo depende del tiempo de combustión que es determinar por el tamaño de las particular a quemar (gotas)

Para hidrocarburos se requieren de 15 a 35 reacciones intermedias. El proceso global de lo cuantifica por medio de la siguiente ecuación.



Con rapidez de reacción  $K_F$

$$K_F = A T^b \exp \left( - \frac{E}{RT} \right)$$

Donde

$$A = \frac{5.52 \times 10^8}{p^{0.825}} \left( C_{C_n H_m} \right)^{1/2} \left( C_{O_2} \right)$$

$$b = 1$$

(= Concentración en masa

P= Presión de la mezcla (at)

$$\frac{E}{R} = 12.2 \times 10^3 \text{ } ^\circ K$$

Para el caso de combustible líquido en gotas tenemos que

la cantidad de líquido evaporado bajo el calor de los gases es proporcional al diametro de la gota.

$$M_{\text{evap}} \propto d$$

De donde se obtiene una relación empirica para determinar el tiempo de evaporación de una gota

$$t_{\text{evap}} = Kd^2$$

Con  $d$  = Diámetro de la gota en centímetros  $t$  = tiempo en segundos y  $K$  puede tomar valores de 100 a 500

Para una buena combustión, la rapidez de evaporación debe ser aproximadamente igual a la rapidez del combustión.

Si esto es así tenemos que el tiempo de evaporación es igual al de combustión  $t_{\text{evap}} = t_c$

Para una buena combustión tiene que ser menor o igual al tiempo de residencia Donde

$$\tau = \frac{\bar{P} V_c}{J}$$

Con  $J$  = Flujo total ( Comb + aire )

$V_c$  = Volumen de la cámara

$\bar{P}$  = Densidad del Gas

Teniendo esto presente podemos determinar la penetración o longitud de la llama y de acuerdo al tipo de atomizador obtener el diámetro máximo del cono o cuerpo de llama.

$$L = V t_c$$

En la que la penetración  $V =$  Velocidad de la gota.

Como podemos darnos cuenta la determinación del tiempo de combustión es solamente una aproximación, lo que significa que para cada tipo de atomizador se tendrá que comprobar, hecho desventajoso para el proyectista, esta desventaja es superada con la ayuda de tablas normalizadas por los fabricantes de quemadores donde aparecen las características necesarias para el diseño. Valores típicos del diseño de los cuales nos valemos constan en tabla 15

Los hornos tienen una aplicación muy amplia, con formas muy diversas lo cual implica que debe contarse también con distintas formas de refractarios que se pueden clasificar en formas standards y en formas especiales.

Como se dijo hay un gran número de formas standards de refractarios mantenidas en existencias por la mayoría de los fabricantes.

Se debe consultar los catálogos de los fabricantes al seleccionar dichas formas, pero los mas comunes se ilustra en las tablas 16, 17, 18. Estas formas han sido standardizadas por el AMERICAN REFRACTARIES INSTITUTE y por el BUREAU OF SIMPLIFICATION DEL DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE

LOS EE.UU.

Las dimensiones americanas,  $a \times b \times c$ , de las losas para generadores son . en pulgadas:

18 x ( 669) x 3; 18 x ( 96 12) x 4; 22-1/2 x(669)x3;  
22-1/2 x(9612) x 4; 27x9x3 ; 27x(9612)4 ; 31-1/2 x12x4;  
36 x 12 x 4.

Los siguientes ladrillos de arco, cuñas y clave tienen las dimensiones máximas  $a \times b \times c$  de 9 x4-1/2x2-1/2 pulgadas. Las dimensiones mínimas,  $a \times b \times c$  son las que se indican a continuación :

Nº 1 de arco ,  $c = 2-1/8$ "

Nº 2 de arco ,  $c = 1.3/4$ "

Nº 3 de arco ,  $c = 1$ "

Nº 1 de cuña ,  $c = 1-7/8$ "

Nº 2 de cuña ,  $c = 1-1/2$ "

Nº 3 de cuña ,  $c = 2$ "

Nº 1 de clave,  $b = 4$ "

Nº 2 de clave,  $b = 3-1/4$ "

Nº 3 de clave.  $b = 3$ "

Nº 4 de clave  $b = 2-1/4$ "

Oblicuo o sesgado  $b = 1-1/2$  "

de canto en bisel  $c = -1/8$  "

Nº 1 de cuello o garganta ,  $a = 3-1/2$  "  $c = 5/8$ "

Nº 2 de cuello ,  $a = 2-1/2$  ;  $c = 5/8$ "

No3 de cuello ,  $a = 0$ " ,  $c = 5/8$  de extremo oblicuo  
 $a = 6-3/4$ " y de costado oblicuo,  $b = 2-1/4$ " , de Jamba ,  
9" x 2-1/2" ; de Arista de Arco  $c = 2-3/8$  .

Las formas especiales son mas costosas que los refrac

tarios *estandardes*, y como ordinariamente son moldeados a mano, no seran de estructura tan densa y uniforme como el ladrillo regular. Cuando son necesarias formas especiales, deben proyectarse tan sencilla como sea posible y se deba mantener el tamaño maximo por debajo de 76 Cm, de ser posible. Tambien es combeniente hacer todas las formas con la dimensión vertical que sea un multiplo par de 2.5" ( 63 mm) mas una junta, de mane= ra que puedan ser ligadas con el resto de la fabrica de ladrillos.

Otro de los factores que se deben tener en cuenta para el diseño de camaras de combustión, es la duración. Parametros de suma importancia ya que tiene que ver con el costo de la camara u horno. El parametro que consideramos en camaras de combustión es la intensidad que para hornos típicamente esta comprendido entre 27000 y 54000Cal/h m<sup>2</sup>.

Despues de analizar las restricciones con las que se ve el proyectista y teniendo en cuenta las condiciones de nuestro mercado que porsupuesto es reducido. Concluimos que podemos utilizar ladrillo rectangular de 9" para construir las paredes laterales y el fondo. Queda elegir el ladrillo que se usara en la cubierta, y teniendo en cuenta que en el Laboratorio de Fundición existia ladrillo de cubilote o " bloque # C de 9" para cubilote", el que nos da gran facilidad para la construcción de una camara de combustión que cualquier otro ladrillo disponible en el mercado. Entoces con estos tipos de ladrillos se analiso que se podia construir una camara o tunel de combustión de sección transversal de 34.29Cm de ancho y 29.57 Cm de alto como se muestra en la figura 16 .La profun-

didad o largo del tunel es de 137.16 Cm con lo cual se forma una celda muy representativa de condiciones reales, como hornos de vidrio, laminación, etc.

### 3.2. ELECCION DE LA TEMPERATURA DEL TUNEL

La temperatura en un proceso, es un factor determinante, por lo tanto la buena elección de la temperatura en un proceso nos determina la correcta conclusión de un proceso térmico. Así en la fabricación del vidrio la máxima temperatura a la cual el horno opera es de 1560°C aproximadamente y en un horno de laminación la temperatura apropiada es de 1400°C aproximadamente, que sería la temperatura máxima del horno o sea esto quiere decir que la temperatura máxima de llama será de 1400°C para el propósito de laminación.

Para otros objetivos tendremos otra diferente temperatura de llama, variación que se logra a través del aire de combustión. Podemos obtener la máxima temperatura de la llama de un combustible si la combustión se realiza con la cantidad estequiométrica de aire.

En el transcurso de esta tesis trataremos de operar con una temperatura de 1400°C aproximadamente, que es como se dijo la que se utiliza en hornos de laminación y forja.

Teóricamente esta temperatura se obtiene como se dijo anteriormente en base a la cantidad de aire en la combustión. Entonces haciendo un balance de energía del horno tenemos:

$$\dot{M}_a h_a + \dot{M}_c (h + E_q) = \dot{M}_g h_g$$

Asumiendo gas ideal  $h = C_p T$  entonces

$$\dot{M}_a C_p T_a + \dot{M}_c C_p T_c + \dot{M}_c H_R = \dot{M}_g C_p T_g$$

Pero  $\dot{M}_g = \dot{M}_a + \dot{M}_c$

Si consideramos un  $\bar{C}_p$  promedio tenemos:

$$\begin{aligned} \dot{M}_c H_R &= \bar{C}_p (\dot{M}_g T_g - \dot{M}_c T_c - \dot{M}_a T_a) \\ &= \bar{C}_p (\dot{M}_a T_g + \dot{M}_c T_g - \dot{M}_c T_c - \dot{M}_a T_a) \\ &= \bar{C}_p \dot{M}_a (T_g - T_a) + \bar{C}_p \dot{M}_c (T_g - T_c) \end{aligned}$$

En esta ecuación el último término tiene un valor pequeño, con respecto a los otros dos, por lo tanto :

$$M_{c/a} = \frac{\bar{C}_p (T_g - T_a)}{H_R}$$

En base a esta relación combustible-aire y la relación estequiométrica, se puede determinar las condiciones de operación.

Para un combustible de la forma  $C_x H_y$  la relación estequiométrica Aire-Combustible se obtiene de la ecuación

$$M_{a/c} = \frac{28.95 (x + 0.25 y) 4.76}{12 x + y}$$

Es apropiado y de uso común representar al diesel por la fórmula  $C_{12} H_{26}$  Entonces

$$M_{a/c} = \frac{28.95 (12 + 0.25 (26)) + 4.76}{12 (12) + 26}$$

$$= 14.9961 = 15.$$

Y la relación a que debe operar el quemador para obtener la temperatura propuesta sin tener en cuenta las pérdidas de energía es

$$M_{a/c} = \frac{H_R \cdot N_c}{\bar{C}_p (T_g - T_a)}$$

Donde  $H_R$  para el diesel de gravedad relativa 0.847 o reducida a grados API por la relación de uso común

$$API = \frac{141.5}{\text{Dens. Relt. } 60/60^\circ F} - 131.5$$

$$API = 35.56 \text{ Grados}$$

Se determina de la figura 17 con la curva para el aceite combustible tenemos un  $H_R$  de  $18.500 \frac{BTU}{Lb.}$

O por el método teórico que se describió, queda:

$$18.400 \frac{BTU}{Lb.}$$

Entonces

$$M_{a/c} = \frac{18.500 (0.47)}{0.25 (2552 - 90)}$$

$$= 30.06 (0.47) = 14.2$$

El porcentaje de exceso de aire se obtiene

$$\% \text{ Aire de Exs} = \left( \frac{14.2}{15} - 1 \right) 100$$

$$= - 5.3\%$$

La temperatura propuesta se puede obtener con una combustión incompleta.

### 3.3. SELECCION DEL AISLAMIENTO

Un proyectista al hacer el diseño determina los materiales de construcción de acuerdo a las condiciones de diseño. Por lo tanto numerosas empresas tratan de satisfacer estas necesidades fabricando materiales de construcción (materias primas) en forma estandarizada. Así tenemos para el diseño de cámaras de combustión disponemos de una variedad de refractarios, que son:

El ladrillo de arcilla refractaria; de alto contenido de alúmina; de sílice; de magnesita; de cromo; ladrillos refractarios aislantes y otros tipos especiales.

El ladrillo de arcilla refractaria se fabrica, como lo dice su nombre, de arcillas especiales, que comprenden todas las arcillas refractarias que resisten el rojo blanco. Las arcillas refractarias pueden ser divididas en arcillas plásticas y arcillas de pedernal duro; también pueden clasificarse con respecto a su contenido de alúmina.

Los ladrillos refractarios se fabrican ordinariamente de una mezcla de las dos arcillas mencionadas, la cual es conformada, después de mezclada con agua, con la forma requerida. Se puede reemplazar algo o toda la arcilla de pedernal por arcillas con alto grado de cocción, o calcinadas, llamadas chamotas, procedentes de residuos y piezas rotas de la fabricación de productos refractarios, que se muelen. Una gran proporción de los ladrillos modernos se moldea por el proceso de prensado en seco o prensado potente, en el que la conformación se efectúa bajo presión elevada y con un contenido bajo de agua. Aún se fabrican grandes cantidades de ladrillos por estrusión y moldeado a mano.

Los ladrillos secados son cocidos en hornos intermitentes o en hornos de túnel a temperaturas que varían entre 1205° y 1480°C. Los hornos de túnel dan producción continua y una temperatura uniforme de cocción.

Los de arcilla refractaria se usan en montaduras de calderas, hornos de fusión, incineradores y mucha cantidad de hornos para acero y metales no ferrosos. Son resistentes al agrietamiento por cambio de temperatura, se mantienen bien bajo muchas clases de escoria, pero no son, en general, apropiados para ser usados con escorias de alto contenido de cal, escorias de cenizas fluidas de carbón bajo condiciones severas de carga.

Los ladrillos de alto contenido de alúmina se fabrican de materias primas ricas en alúmina, tales como la diáspora. Se clasifican en grupos de 50, 60, 70, 80 y 90 por ciento de alúmina. Cuando están bien cocidos, estos ladrillos contienen una cantidad mayor de mullita, y menor de la fase vítrea, que la que está presente en los ladrillos refractarios. También hay corindón en muchos de estos ladrillos.

Los ladrillos de alto contenido de alúmina se usan generalmente para condiciones severas poco comunes de temperatura o carga. Se emplean también muchos en hornos para cal, en hornos rotatorios para cemento, en puertas y regeneradores de tanques para vidrio, para resistir las escorias en algunos hornos metalúrgicos; su precio es mas elevado que el del ladrillo refractario común.

Los ladrillos de sílice se fabrican de roca Ganister triturada, que contiene aproximadamente de 97 a 98 por ciento de sílice. Se emplea un aglutinante de 2% de cal y los ladrillos son cocidos en hornos intermitentes a temperaturas entre 1400 y 1540°C, durante varios días, hasta obtener un volumen estable. Son especialmente valiosos donde se requiere una buena resistencia a temperaturas elevadas. En la industria del acero ha encontrado recientemente algún uso del ladrillo de sílice superrefractario; tiene un menor contenido de alúmina y a menudo menor porosidad.

Los ladrillos de sílice son muy usados en hornos de coque, en los techos y paredes de los hornos de Martin-Siemens, en los techos y paredes laterales de tanques para vidrio y en revestimientos interiores de hornos de acero eléctricos ácidos. Aunque el ladrillo de sílice se agrieta fácilmente por un cambio de temperatura por debajo del rojo, es muy estable si se mantiene la temperatura superior a este límite y, por esta razón, resiste bien en los hornos regenerativos. Cualquiera estructura de ladrillos de sílice debe ser calentada lentamente hasta la temperatura de trabajo, una estructura grande requiere con frecuencia 2 semanas o más para alcanzar dicha temperatura.

Los ladrillos de magnesita se fabrican de óxido de magnesita triturado, el cual se produce calcinando roca de magnesita natural a temperaturas elevadas. Es preferible una roca que contenga algún porcentaje de óxido de hierro, ya que esto permite que la roca sea cocida a una temperatura inferior a la que se necesitaría con materiales puros. Los ladrillos de magnesita son cocidos generalmente a una temperatura relativamente alta en hornos intermitentes o de túnel, aunque se están produciendo ahora grandes tonelajes de ladrillo sin cocer. Estos últimos se fabrican con un tamaño especial de grano y con un aglutinante tal como un oxiclورو. Una gran proporción de ladrillo de magnesita se fabrican en norteamérica empleando materias primas extraídas del agua del mar.

Los ladrillos de magnesita son básicos y se emplean siempre que es necesario resistir escorias de alto contenido de cal, como en el horno básico Martin-Siemens. También encuentran aplicación en hornos para la industria del refinado del plomo y del cobre. Los ladrillos sin cocer, prensados hidráulicamente, encuentran gran aplicación en revestimientos interiores de hornos de cemento. Los ladrillos de magnesita no son tan resistentes al agrietamiento por cambio de temperatura como los de arcilla refractaria.

Los ladrillos de cromo se fabrican casi de la misma manera que los de magnesita, pero con el mineral natural cromita. Los minerales comerciales contienen siempre magnesio y alúmina. También se fabrican ladrillos de cromo sin cocer, prensados hidráulicamente.

Los ladrillos de cromo son muy resistentes a todos los tipos de escoria. Se usan como separadores entre refractarios ácidos y básicos, también en pozos de recalentamiento y en pisos para hornos para forjado. El ladrillo sin cocer, prensado hidráulicamente, encuentra ahora extensa aplicación en las paredes de los hornos Martin-Siemens. Los ladrillos de cromo se emplean en hornos para recuperación de sulfuro y en cierto grado en el refinado de metales no ferrosos. Se fabrican ahora en grandes cantidades ladrillos básicos que combinan varias propiedades de los de magnesita y cromita, u que sólo tienen ventajas sobre uno u otro de estos últimos para algunos fines.

Los ladrillos refractarios aislantes son de una clase que contienen arcilla refractaria o caolín altamente poroso. Son ligeros: (aproximadamente pesan de 1/2 a 1/16 del peso de los de arcilla refractaria), de baja conductividad térmica, y no obstante, suficientemente resistentes a la temperatura para ser usados con éxito sobre el lado caliente de la pared de un horno, permitiendo así muros delgados de baja conductividad térmica y bajo contenido de calor. El bajo contenido de calor es particularmente valioso para el ahorro de combustible y tiempo al elevar la temperatura del horno y permite que se hagan cambios rápidos de temperatura y enfriamiento rápido. Estos ladrillos se fabrican de una gran variedad de maneras, tales como mezclando material orgánico con la arcilla y quemándolo a continuación para formar poros; o bien se puede incorporar a la mezcla de arcilla y agua algún elemento estructural que produzca burbujas, el cual es luego

retenido en el ladrillo cocido. Los ladrillos refractarios aislantes se clasifican en varios grupos, según el límite máximo de aplicación: los intervalos son hasta  $870^{\circ}$ ,  $1095$ ,  $1260^{\circ}$ ,  $1425^{\circ}$  y por encima de  $1540^{\circ}\text{C}$ .

Los refractarios aislantes se emplean principalmente en la industria del tratamiento térmico para hornos de tipo intermitente; el bajo contenido de calor permite notable ahorro de combustible - en comparación con el ladrillo refractario. Se usan también en hornos para alivio de esfuerzos o tensiones, hornos para procesos químicos, calentadores o serpentines de aceite y en cámaras de combustión de hornos domésticos de quemador de aceite. Ordinariamente tienen una vida igual a la del ladrillo pesado al que reemplazan. Son particularmente adecuados para la construcción de hornos experimentales o de laboratorio, porque además pueden ser cortados o labrados a máquina en cualquier forma. No son resistentes a la escoria fluída.

Hay gran número de tipos de ladrillos especiales, que se pueden obtener de fabricantes particulares. Los refractarios de caolín de alto cocido son particularmente valiosos bajo condiciones severas de temperatura y fuertes cargas o bajo condiciones severas de agrietamiento por cambio de temperatura, como en el caso de instalaciones de calderas de alta temperatura calentadas por aceite o de los pilares bajo los hornos de esmaltado. Otro ladrillo para los mismos usos es uno de alto cocido de arcilla aluminosa de Missouri.

Hay en el mercado gran número de ladrillos fabricados de materiales fundidos eléctricamente, tales como Mullita fundida, alúmina fundida y magnesita fundida. Estos ladrillos, aunque de alto costo, son particularmente adecuados para condiciones severas.

Los ladrillos de carburo de silicio ya sea recristalizado o aglutinado con arcilla, tiene alta conductividad térmica y encuentran aplicación en paredes de muflas y como material resistente a la escoria.

Los ladrillos de forsterita, la circonita y el circón que encuentran cierto uso limitado, como también, los ladrillos resistentes a ácidos, que consisten en un cuerpo denso como de gres, se emplean para revestir tanques y conductos en la industria química. Los bloques de carbón se usan como revestimientos para los crisoles de los altos hornos; aunque de uso limitado en los Estados Unidos. Los ladrillos de mullita o alúmina vaciados por fusión son muy usados para revestir tanques de vidrio.

Las piedras naturales, como la arenisca o el esquisto micáceo, se usan como refractarios en hornos metalúrgicos, por ejemplo, como revestimientos de convertidores Bessemer.

La esteatita se usa en los hornos recuperadores de sosa y sulfato, pero ha sido reemplazada casi completamente por el cromo.

Para completar la investigación de refractarios presentamos en la tabla 19 la composición química para algunos de los refractarios. Las propiedades físicas se dan en la tabla 20. Para detalles sobre los ensayos estándares se deben consultar los ASTM standards. En la tabla 21 está indicada la variación con la temperatura del calor específico de los refractarios, la cual por datos obtenidos por Bradshaw y Emery, y por Heyn para ladrillos de magnesita, presen tado a continuación en la tabla 20, Wilson, Holdcroft y Mellor dan la fórmula siguiente para el calor específico de los ladrillos de arcilla refractaria:

$$\text{Calor específico medio} = 0.192 + 0.000059 (T + M.8)$$

en donde T está en grados C.

Prácticamente todo ladrillo es colocado con algún tipo de material de unión para producir una estructura más estable y para cerrar herméticamente las juntas. Este material puede ser arcilla refractaria molida o un mortero preparado especialmente que contenga chamota (mezcla de refractario calcinado y cemento re-

fractario) para reducir la construcción. Los morteros de ligazón pueden dividirse en tres clases generales. La primera es la de los morteros que fraguan al aire, los cuales contienen con frecuencia un aglutinante químico u orgánico para producir una fuerte adherencia al secarse o cocerse a temperaturas relativamente bajas. Muchos de los morteros que fraguan al aire no deben ser usados a temperaturas extremadamente elevadas a causa de la acción fundente del ingrediente para fraguado al aire que reduce su punto de fusión. A los de la segunda clase se les llama morteros que fraguan al calor y requieren temperaturas de más de  $1095^{\circ}\text{C}$  para producir una buena unión. Estos morteros varían en punto de vitrificación, produciendo algunos una fuerte adherencia en los límites inferiores de temperaturas y requiriendo otras temperaturas muy altas para dar buena resistencia. La tercera clasificación comprende los morteros de base especial, como los de sílice, magnesita, carburo de silicio o cromo, los cuales son mezclados especialmente para ser usados con sus ladrillos respectivos. El mortero a base de cromo puede ser usado satisfactoriamente con ladrillos de arcilla refractaria en muchos casos.

Los morteros de ligazón refractaria deben seleccionarse de preferencia sobre el consejo del fabricante del refractario para obtener buen servicio, aunque hay un número considerable de fabricantes independientes de morteros que proporcionan productos excelentes. Se necesitan de 140 a 180 kg. de mortero seco por millas de ladrillos para juntas delgadas, las cuales son convenientes en la mayoría de las construcciones de hornos. Para las juntas mas gruesas alisadas con la lana, se requieren hasta 230 kg. por millar. En el caso de morteros a base de cromo, deben proveerse 270 kg por millar de ladrillos, y para el cemento de magnesita, 360 kg.

Las propiedades para la aplicación o trabajo del mortero de ligazón son importantes. Los morteros para refractarios aislan-

tes deben ser seleccionados cuidadosamente, y que muchos de los productos comerciales no retienen el agua el tiempo suficiente para permitir que se forme una buena junta. Hay morteros especiales para este fin que son enteramente satisfactorios.

Los revestidos ó recubrimientos se usan para proteger la superficie caliente de los refractarios, especialmente cuando están expuestos a gases cargados de polvo o a escorias. Estos recubrimientos constan ordinariamente de chamota molida y arcilla refractaria de textura un poco más gruesa que el mortero. Hay también revestidos a base de cromo que son bastante resistentes a las escorias y, en unos cuantos casos, las arcillas naturales que contienen sílice y feldespatos son satisfactorias.

Los recubrimientos pueden ser aplicados a la superficie del ladrillo con una brocha en capas delgadas, de uno 1.5 mm. de espesor, o pueden aplicarse por pulverización sobre la misma con un cañon lanzamento, siendo este último el método que generalmente da mejores resultados. Algunos tipos de recubrimiento pueden ser aplicados en capas mucho más gruesas, pero se debe tener cuidado de asegurarse que el recubrimiento elegido se adapte al ladrillo particular usado, porque de otra manera puede descascarillarse en servicio. El recubrimiento cierra los poros y huecos de la superficie del ladrillo y presta un servicio más continuo e impermeable a la acción de los gases del horno y de la escoria. Sin embargo, no es un curallotodo para las dificultades que se tienen con los refractarios.

Las mezclas plásticas y de apisonado constan generalmente de arcilla refractaria y chamota gruesa de aproximadamente la misma composición que el ladrillo refractario original. Se emplean en la reparación de las paredes de los hornos que han sido dañadas por agrietamientos debidos a cambios de temperaturas o por la erosión de la escoria y también para construir los muros completos de hornos en ciertas instalaciones, como hogares de

calderas pequeñas. También se emplean para conseguir formas especiales o irregulares, en moldes provisionales de madera, en la construcción real de los hornos.

Algunas de las mezclas plásticas y de apisonamiento contienen silicato de sodio y son de fraguado al aire, de manera que se produce una estructura resistente tan pronto como se seca el material. Otras tienen como base mineral de cromo o carburo de silicio, los cuales hacen una mezcla que tiene una gran conductividad térmica y una buena resistencia a la erosión de la escoria. Estas mezclas son usadas con frecuencia en paredes enfriadas por agua de los hogares de las grandes calderas; son aplicadas alrededor de los tubos y son mantenidas en posición por medio de clavos pequeños soldados a las paredes de los mismos. La mezcla plástica de cromo ha sido usada con buen éxito para pisos de hornos de calentamiento y para las soleras del laboratorio o crisol de los hornos Martin-Siemens.

Las mezclas vaciables son un hormigón refractario que ordinariamente contiene cemento de alto contenido de alúmina que les comunica la propiedad de fraguado. Estas encuentran aplicación considerable en la formación de las paredes de horno intrincadas en moldes de madera; se han vaciado satisfactoriamente grandes estructuras por este método. Este tipo de mezcla es muy usado para las paredes desviadoras de las calderas, en las cuales pueden ser vaciadas en su posición alrededor de los tubos. Las mezclas vaciables ligeras con buenas propiedades aislantes se emplean para revestir puertas de hornos.

Luego de hacer una descripción resumida de los refractarios. Podemos seleccionar el refractario apropiado para un objetivo de terminado.

La selección del refractario más adecuado para un fin dado que manda experiencia en la construcción de hornos. Teniendo presente ciertos criterios. Así, una calidad de ladrillo que cuesta el doble que otra es preferible a esta, si tiene duración doble,

porque en el costo total hay que incluir los costos de las colocaciones. Además un ladrillo que de un servicio mas largo reduce el período de paro del funcionamiento del horno. En donde el efecto de la escoria o el de la abrasión son severos, es conveniente un ladrillo de estructura densa. Si las condiciones que producen agrietamiento por cambios de temperatura son importantes, es mejor un ladrillo de estructura más flexible, aunque hay casos en los que una estructura muy densa da mejor resistencia a dicho agrietamiento que una mas ligera.

En cualquier horno cuando no hay peligro por la acción de la escoria, con frecuencia es mas económico usar un refractario aislante. Aunque este ladrillo puede costar mas por unidad, permite paredes mas delgadas, de manera que el costo total de construcción puede no ser mayor que el que se tendría con ladrillo ordinario. La sustitución del ladrillo pesado por refractario aislante en los hornos intermitentes ha reducido a veces a la mitad, el consumo de combustible.

Por las razones y sugerencias hechas anteriormente en un horno experimental se debe usar refractario aislante, y en nuestro caso cumple satisfactoriamente un ladrillo refractario aislante de arcilla refractaria.

Analizando nuestro mercado que solo hay ladrillo de arcilla refractaria y en forma de cuña y recto, concluimos que al no disponer de refractario aislante, construir la pared lateral al menos, de dos tabiques uno de ladrillo refractario pesado (arcilla refractario) y otro de piedra pomez<sup>1</sup> con juntas de arcilla refractaria en una proporción aproximada de 15 y 25% respectivamente.

La tendencia en la construcción de hornos es hacer sus paredes relativamente delgadas, ancladas y soportadas a intervalos frecuentes por piezas de fundición o de aleación resistentes al calor, las cuales a su vez, son sostenidas por un armazón y no descansen sobre la base. Las paredes pueden hacerse refractarios fuer

<sup>1</sup> La piedra pomez, es un residuo volcánico conocida como pumita.

tes respaldados con materiales aislantes como es nuestro caso o de un refractario aislante.

Modernamente como se dijo las paredes de un horno deben ser delgadas con el fin de que el costo del horno sea bajo, pero adversamente está el aumento de fuga de energía calórica que también aumenta el costo de operación. Se ha determinado el espesor óptimo de una pared plana generalizada en la siguiente fórmula (Referencia, aislamiento térmico en la industria).

$$e = \left( \frac{HP}{am} \lambda \Delta T \right)^{1/2} \quad | \text{mm} |$$

En la que:

H = número de horas de operación por año

P = precio de la Kcal en \$/Kcal

a = tasa de amortización anual del aislante

m = gradiente del precio del aislamiento en \$/m<sup>3</sup>

$\lambda$  = coeficiente de conductividad del aislante en Kcal/m<sup>2</sup>hr°C

$\Delta T$  = diferencia de temperatura de la superficie interior y exterior de la pared.

En el presente caso particular asumimos que el horno opera alrededor de 400 horas por año y una diferencia de temperatura entre las dos superficies de 650°C y una conductividad de la pared de 3.481074 cal/hr m<sup>2</sup>°C. Equipo amortizado en 4 años entonces tenemos:

$$\lambda = 3.481074 \text{ cal/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 650^\circ\text{C}$$

$$a = 0.25\%$$

$$H = 400 \text{ hr/año}$$

$$P = 0.0001094 \text{ } \$/\text{cal}$$

$$m = 30135 \text{ } \$/\text{m}^3$$

Con estos parámetros reemplazados en la ecuación que determina el espesor óptimo tenemos

$$e_0 = 114.6 \text{ mm } 4.5''$$

Entonces para este espesor óptimo el tiempo transiente e valuado por el método gráfico de schmidt como se ve en la figura 18 que es de 2.22 horas.

En la construcción de hornos resultan algunas fallas ocasionadas por las juntas de dilatación inapropiadas. Las juntas mencionadas deben ser instaladas por lo general a lo menos cada 3 metros, aunque en algunas estructuras de baja temperatura la separación puede ser mayor. Para construcción de alta temperatura, los márgenes que se deben dejar en juntas de dilatación, en cm por metro, deben ser los que siguen: arcilla refractaria, 0.52 - 0.78; ladrillo de alto contenido de alúmina, 0.78 a 1.04; ladrillo de sílice 1.04 - 1.56; ladrillo de magnesita, 2.08; ladrillo de cromo, 130; ladrillo de fosforita, 2.08. La figura 19 ilustra algunos ejemplos típicos de juntas de dilatación. Con frecuencia se usa en estas juntas cartón corrugado.

#### 3.4. PERDIDAS DE CALOR EN LAS PAREDES

Teniendo presente las características reales de temperatura media 1050.6°C, el flujo de gas caliente, obtenido a partir de las siguientes condiciones de operación como consumo de combustible 1.86 galones por hora y con una combustión incompleta caracterizada por la cantidad inferior a la relación estequiométrica aire combustible, comprobado con la evaluación del contenido porcentual del CO<sub>2</sub> (12%) y el O<sub>2</sub> (1%) y con ayuda de la figura 20 se determina que la combustión se realiza con el 82% del aire teórico o estequiométrico.

Para el diesel (C<sub>12</sub> H<sub>26</sub>) la relación estequiométrica

$m_a/c = 14.99$  y con

$$\dot{m}_c = 1.86 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} \frac{3.785 \text{ lt}}{\text{gal}} 0.857 \frac{\text{kg}}{\text{lt}}$$

$$\dot{m}_c = 5.9636 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

pero sabiendo que  $\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} = 14.99$

$$\dot{m}_a = 89.395 \text{ kg/hr}$$

entonces

$$\dot{m}_{a \text{ real}} = 0.82(\dot{m}_a) = 73.30$$

Luego

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_{a \text{ real}} = 79.2675 \text{ kg/hr}$$

Encontramos las pérdidas de calor en las paredes mediante la ecuación

$$Q/A_R = U_R (\bar{T}_g - T_a)$$

Donde

$$U_R = \frac{1}{\frac{1}{h_R} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{h_0}}$$

Sabiendo que  $h_R$  es el coeficiente convectivo total en la parte interior del refractario que es

$$h_R = h_i + h_r$$

Considerando lo mencionado anteriormente

$$h_i = 0.664 P_r^{1/3} Re_L^{1/2} \frac{K}{L}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$\text{Si } \rho = 0.0167 \text{ lb/pie}^3$$

$$\mu = 3.3807 \times 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{pie seg.}}$$

$$Pr = 0.7437$$

$$K = 0.0424 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie } ^\circ\text{F}}$$

$$V = \frac{mg}{\rho A}$$

$$A = 1.09 \text{ pie}^2$$

$$\text{Entonces } V = \frac{174.55 \text{ lb/hr}}{0.0167 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} 1.09 \text{ pie}^2} \frac{\text{hr}}{3600 \text{ seg.}}$$

$$V = 2.6667 \text{ pie/seg.}$$

$$\text{Para } L = 3.91 \text{ pie}$$

$$Re = 5150.75 \text{ (laminar)}$$

$$hi = 0.468 \frac{\text{BTU}}{\text{pie}^2 \text{ hr}} \quad | 2.285 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^2} |$$

$h_r$  coeficiente convectivo por radiación.

$$h_r = \epsilon F_T$$

De la figura 15 para : temperatura radiante de  $1923^\circ\text{F}$   
y temperatura absorbente  $1440^\circ\text{F}$

$$F_T = 65$$

y  $\epsilon$  = que es la emisividad de la llama. Esta emisividad es evaluada suponiendo llama transparente de la siguiente manera.

A partir del análisis de los productos de la combustión se determina los porcentajes de los componentes como son el  $\text{CO}_2$  y el vapor de  $\text{H}_2\text{O}$ , etc.

En el presente caso con un analizador de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  en el punto donde se tiene la temperatura mas alta  $1238^\circ\text{C}$  ( $2260^\circ\text{F}$ ) se tuvo

$$\text{CO}_2 = 12\%$$

$$\text{O}_2 = 1\%$$

Se determina la presión parcial del  $\text{CO}_2$  para una presión interna del horno de una atmósfera.

$$P_{\text{CO}_2} = 0.12 \text{ atmósferas}$$

y la presión parcial del vapor de agua, obtenida de la relación que comunmente se utiliza

$$P_w = \frac{P_T w}{0.62198 + w}$$

donde  $w$  es la masa de agua por unidad de masa de aire seco existente en el ambiente, valor obtenido de la carta psicrométrica con las temperaturas de bulbo seco  $33.3^\circ\text{C}$  ( $92^\circ\text{F}$ ) y de bulbo húmedo de  $31.6^\circ\text{C}$  ( $89^\circ\text{F}$ ) tenemos  $w = 0.0294$  luego mas la cantidad de agua del combustible  $w = 0.1066$

$$P_w = \frac{1(0.136) \text{ at}}{0.62198 + 0.136}$$

$$= 0.179 \text{ atmósferas}$$

Para una longitud promedio de hacer radiantes igual a 3 pies obtenido de la longitud física de la llama se evalúa la emisividad del  $\text{CO}_2$  en la figura 10 con el producto  $P_{\text{CL}} = 0.36 \text{ at-pie}^2$ , temperatura  $1050.6^\circ\text{C}$  ( $1923^\circ\text{F}$ ).

$$\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.1$$

De igual forma la emisividad del vapor de agua se obtiene de la figura 12 y  $P_{wL} = 0.537$

$$\epsilon_w = 0.13$$

$$\text{y así } \epsilon = \epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_w$$

$$\epsilon = 0.23$$

Entonces

$$h_R = 0.23(65) \\ = 1495 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} = 14.95$$

pero asumiendo la emisividad del tubo de 0.8  $h_R = 11.96$  de donde

$$h_R = 0.47 + 11.96 \\ = 12.43 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \quad 60.66 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Como se dijo anteriormente al valor  $h_R$  obtenido del análisis teórico. Para obtener el  $h_R$  apropiado típicamente se agrega un % al valor teórico pero es usual

$$h_R = 10 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \quad (4.88 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}})$$

Entonces si  $h_o = 3.5$  valor obtenido de la tabla 22 y  $L_1 = 2.5''$   $L_2 = 2''$  con  $K_1 = 8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$  inch como primera aproximación obtenida de la figura 21 y  $K_2 = 0.26 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$  obtenido de la ta-

bla 23 para un tabique del 75% de piedra pomez y 25% de arcilla refractaria en el caso de las paredes laterales, evaluado de la siguiente manera

$$K_e = 0.75 K'_2 + 0.25 K'_1 \\ = 0.75(1.68) + 0.25(7.5) \\ = 3.135 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \text{ inch}$$

Evaluamos  $U_R$

$$U_R = \frac{1}{\frac{1}{12.5} + \frac{2.5}{8} + \frac{2}{3.135} + \frac{1}{3.5}} \\ = 0.7597786 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$\begin{aligned}
 y \quad q_A &= U_R (T_g - T_a) \\
 &= 0.7597786 (1923 - 90) \\
 &= 1392.7 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2}
 \end{aligned}$$

Para estado estable

$$q = h_R (T_g - T_{S1})$$

$T_{S1}$  es la temperatura de la superficie interior

$$T_{S1} = T_g - \frac{q}{h_R}$$

$$T_{S1} = 1923.1 - \frac{1392.7}{12.5} =$$

$$= 1811.7 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (988.7 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$T_{X1} = 1739.8 - \frac{1392.7 (2.5)}{8}$$

$$= 1376.5 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (746 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$T_{S2} = \frac{1392.7}{3.5} + 90$$

$$= 487.9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (253 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$\text{Entonces } K_1 = 8.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \text{ in}$$

Para una segunda aproximación

$$U_R = \frac{1}{\frac{1}{12.5} + \frac{2.5}{8.5} + \frac{2}{3.135} + \frac{1}{3.6}}$$

$$= 0.7752816 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$q = 0.7753 (1923 - 90)$$

$$= 1421.1 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2}$$

$$T_{S1} = T_g - \frac{q}{h_R}$$

$$\frac{q}{L} = \frac{k}{L} (T_{S1} - T_{X1})$$

$$1923.1 = \frac{1392.7 \cdot 2.5}{8} + T_{X1}$$

$$T_{X1} = 1739.8$$

$$T_{S2} = \frac{1392.7}{3.5} + 90 = 487.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1923.1

$$2 \cdot 2.5 \cdot \frac{1392.7}{8}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1923 - \frac{1423.1}{12.5} \\
 &= 1809.3^\circ\text{F} \quad (1023.0^\circ\text{C}) \\
 \times T_{x1} &= \frac{1778.7 - 1421.1 (2.5)}{8.5} \quad \leftarrow \\
 &= 1394.3^\circ\text{F} \quad (190.7^\circ\text{C}) \\
 T_{S2} &= \frac{1443.1}{36} + 90 \\
 &= 484.7^\circ\text{F} \quad (251.5^\circ\text{C})
 \end{aligned}$$

En el piso

$$\begin{aligned}
 q &= U_R (T_g - T_a) \\
 U_R &= \frac{1}{\frac{1}{12.5} + \frac{5}{8.5} + \frac{0.25}{312} + \frac{1}{36}} \\
 &= 1.0785953 \\
 q &= 1.0562 (1923 - 90) \\
 &= 1935.97 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2}
 \end{aligned}$$

En el techo

$$\begin{aligned}
 q &= U_R (T_g - T_a) \\
 U_R &= \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_R} + \frac{r_e \ln r_o / r_i}{k_1} + \frac{1}{h_o}}
 \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}
 r_o &= 36'' \\
 r_i &= 27''
 \end{aligned}$$

$$U_R = \frac{36}{27(12.5)} + \frac{36 \ln(1.33)}{8.5} + \frac{1}{36}$$

$$= 0.6280377 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

$$q = 0.628 (1923 - 90)$$

$$= 1151.19 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2}$$

### 3.5. FLUJO DE CALOR

#### 3.5.1. Paredes

Paredes laterales

$$\bar{A} = 2A_1 + 2A_2$$

$$\bar{A}_1 = (4.86 + 11.57) 58.5$$

$$= 961.15 \text{ pulg}^2 \text{ (6.675 pie}^2\text{)}$$

$$\bar{A}_2 = (13.5 + 4.5) (11.57 + 4.86)$$

$$= 295.74 \text{ pulg}^2 \text{ (2.05 pie}^2\text{)}$$

$$\bar{A} = 17.457 \text{ pie}^2$$

$$Q = qA$$

$$= 1421 (17.457)$$

$$= 24808.14 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

En el piso

$$\bar{A} = (13.5 + 4.5) 58.5$$

$$= 10.53 \text{ pulg}^2 \text{ (7.31 pie}^2\text{)}$$

$$Q = qA$$

$$= 7.31 (1935.97)$$

$$= 14151.9 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

En el techo

$$A = 17.399 (47)$$

$$= 817.8 \text{ pulg}^2 \text{ (5.68 pie}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= qA \\
 &= 1151.19 (5.68) \\
 &= 6538.76
 \end{aligned}$$

$$Q_T = \Sigma Q$$

$$\begin{aligned}
 Q_T &= 0547.4 + 14456.8 \\
 &\quad + 25190.3 \\
 &= 45498.843 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

### 3.5.2. Carga

La transmisión de calor a la carga como se analizó previamente se evalúa con la siguiente ecuación.

$$q = \sigma_{og} (T_g^4 - T_c^4) + h_c A_c' (T_g - T_c)$$

$$c_g = \frac{1}{1/F_{cg} + \frac{1}{\epsilon} - 1}$$

$$F_{cg} = \epsilon \left( 1 + \frac{A_R/A_c}{1 + \epsilon(1-\epsilon)^{-1} F_{Rc}} \right)$$

$$F_{Rc} = \frac{A_c}{A_c + A_R} \quad \text{o} \quad \frac{A_c}{A_R}$$

Para el caso de tener los 20 tubos

$$\begin{aligned}
 A_c &= 20 \pi (0.84) (13.5) \\
 &= 712.5 \text{ pulg}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_R &= 11.57(54)2 + 2(11.57)13.5 \\
 &\quad + 13.5(54) - 10(0.84)13.5 \\
 &\quad + 13(47) \\
 &= 3017.6856 \text{ pulg}^2
 \end{aligned}$$

$$A_R/A_c = 6.6$$

y con  $\epsilon_c = 0.23$  de la figura 21 obtenemos

$$i_g = 0.68$$

$$h_c = 0.33 C_H \frac{K_f}{D_o} \left( \frac{G_{\max} D_o}{\mu_f} \right)^{0.6} P_{\mu f}^{0.3}$$

$$\text{con } K_f = 0.0338 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie } ^\circ\text{F}}$$

$$G_{\max} = 180.6 \frac{\text{lb}}{\text{hr pie}^2}$$

$$\mu_f = 2.59 \times 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{pie seg.}}$$

$$P_{\mu f} = 0.719$$

$$C_H = 0.9$$

$$h_c = 2.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 ^\circ\text{F}}$$

Considerando la carga de un solo tubo que es el presente caso

$$Q = \sigma A_c \epsilon_g (T_g^4 - T_c^4) + h_c A_c (T_g - T_c)$$

$$= \frac{1}{1/\bar{F}_{cg} + \frac{1}{\epsilon} - 1}$$

$$\bar{F}_{cg} = \epsilon \left( 1 + \frac{A_R/A_c}{1 + \epsilon (1 - \epsilon)^{-1} F_{Rc}} \right)$$

$$F_{Rc} = \frac{A_c}{A_R}$$

$$\frac{A_R}{\alpha A_c} = \frac{21.06}{0.8(0.1985)}$$

$$= 132.6$$

y para  $\epsilon_c = 0.23$  en la figura 21

Tenemos

$$\bar{h}_c = \frac{K_f}{D_o} C \left( \frac{V_\infty D_o}{v_f} \right)^n$$

con

$$\begin{aligned} K_f &= 0.0409 \\ v_f &= 0.987 \times 10^{-3} \\ C &= 0.615 \\ n &= 0.466 \end{aligned}$$

$$\bar{h}_c = 4.12 \frac{\text{BTU}}{\text{hr pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

donde

$$Q = 11192.78 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

El calor medido es

$$\begin{aligned} Q &= m C_p (T_2 - T_1) \\ &= 463.5 (0.998) (120 - 86.6) \\ &= 15449.94 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

Con un error del 27.55% entre el teórico y el calor medido.

### 3.5.3. Productos de la combustión

La energía que sale en los productos de la combustión pueden ser cuantificados en forma aproximada por la relación siguiente

$$Q = \dot{m}_g H_g$$

donde  $H_g$  es la entalpía de los gases de escape a la temperatura promedio de  $540^\circ\text{F}$ . De la tabla 24 tenemos:

$$H_g = \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} (240.98)$$

$$\begin{aligned} Q &= 174.755 (240.98) \\ &= 42111,3 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

#### 4. PUNTO DE OPERACION

##### 4.1. SELECCION DEL QUEMADOR

Para seleccionar el quemador primero determinamos la cantidad de calor consumido.

$$\begin{aligned} Q_N &= \Sigma Q \\ &= \text{Carga} + 45500 + 42111,3 \end{aligned}$$

Asumiendo que la carga es el 65% del total

$$= 250318 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

Utilizando diesel con

$$H_R = 130480 \frac{\text{BTU}}{\text{gal}}$$

Requerimos consumir

$$V = \frac{250318}{130480}$$

$$= 1.92 \text{ gal/hr}$$

Por lo tanto el quemador debe ser de 2 gal/hr como mínimo.

##### 4.2. DETERMINACION DE LA MEZCLA AIRE/COMBUSTIBLE

Como se mencionó anteriormente la relación estequiométrica para la combustión del diesel ( $C_{12}H_{26}$ ) se tiene

$$m_a/c = 14.99$$

De acuerdo a las condiciones predeterminadas la relación aire-combustible se obtiene de la ecuación

$$\begin{aligned} 1/(m_a/c) &= \frac{c_p(T_g - T_a)}{H_R} \\ &= \frac{18500 (0.4224)}{0.25 (2462)} \\ &= 14.2 \end{aligned}$$

Entonces el sistema opera con el 94.7% de aire teórico o con un 5.3% de deficiencia de aire

## 5. EQUIPO AUXILIAR

### 5.1. CHIMENEA Y DUCTOS DE ESCAPE

La chimenea consta de dos partes, una base sólida con la geometría de un cono truncado (Fig. 22)

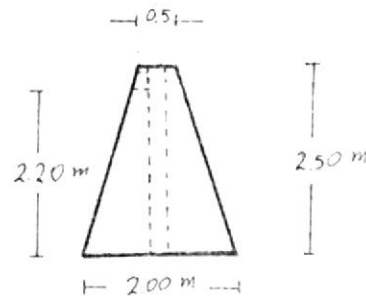


Fig. 22

De hormigón armado, y un ducto cilíndrico de plancha negra de 1/16" con diámetro interior de 8" y longitud 3.5m empotrado en su base 0.5m.

Los ductos de escape a su vez constituyen dos tramos, uno vertical de ladrillo refractario, hasta una altura de 2.20 m en relación al piso, formando un ducto de sección transversal cuadrada de 7" de lado (en su interior), y otro tramo horizontal, igual que el de la chimenea pero de longitud menor (3.00 m).

Evaluación del tiro dado por esta chimenea

Ducto vertical

$$Q = UA(\bar{T}_g + T_a)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{2.5}{8} + \frac{1}{4}}$$

$$= 1.63$$

$$Q = 1.63 (6.49) (1400 - 90) \\ = 13880.7$$

$$T_{g2} = T_{g1} - \frac{Q}{c_p m}$$

$$= 1382^\circ\text{F}$$

$$\bar{T}_g = \frac{1700 + 1382}{2}$$

$$= 1541$$

Segunda aproximación

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{2.5}{7.5} + \frac{1}{4}}$$

$$= 1.46$$

$$Q = 13781 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$T_{g2} = 1700 - \frac{13781}{0.25 (174.75)}$$

$$= 1384.6.6^\circ\text{F}$$

Aproximación aceptable.

Ducto horizontal y chimenea

$$Q = UA(\bar{T}_{g2} - T_a)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1/16}{312} + \frac{1}{2}}$$

$$= 1.666$$

Asumiendo  $T_g = 400^\circ\text{F}$

$$\begin{aligned} Q &= 1.666 (41.2) (810) \\ &= 55593 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{g3} &= T_{g2} - \frac{Q}{c_{pm}} \\ &= 112^\circ\text{F} \end{aligned}$$

Segunda aproximación

$$\begin{aligned} Q &= 1.666 (41.2) (747) \\ &= 51294 \end{aligned}$$

$$T_{g3} = 210.5$$

Tercera aproximación

$$\begin{aligned} Q &= 1.666 (41.2) (797.5) \\ &= 54742.7 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$T_{g3} = 131.5^\circ\text{F}$$

Cuarta aproximación para  $T_{g3} = 170^\circ\text{F}$

$$Q = 53353.3 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$T_{g3} = 163.4^\circ\text{F}$$

Aproximación aceptable.

Evaluación del tiro

tiro = tiro estático - pérdidas por fricción

Tiro estático

$$\begin{aligned} d_I &= \frac{1}{5.2} \text{ o } g \left( 1 - \frac{T_0}{T_g} \right) Z \\ &= \frac{1}{5.2} (1.3) \left( 1 - \frac{90 + 460}{931.7 + 460} \right) 4.00 \\ &= 0.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$= 0.023811 \text{ pulg en H}_2\text{O}$$

Pérdidas por fricción

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

$$= 0.08 \left( \frac{550}{1391.7} \right) (1) = 0.03 \text{ lb/pie}^3$$

$$G = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$= \frac{174.75}{0.03} = 5527.26 \text{ pie}^3/\text{hr}$$

$$V = \frac{G}{A}$$

$$= \frac{5527.26}{0.35} = 4.381 \text{ pie/seg.}$$

$$\mu = 1.3 \times 10^{-7} (773^\circ\text{K})^{0.8} = 2.66 \times 10^{-5} \frac{\text{lb}}{\text{pie}\cdot\text{seg.}}$$

$$\text{Re} = \frac{6(8) 0.03}{12(2.66 \times 10^{-5})} = 4516.2$$

$$f = 0.039$$

$$\text{DP} = \left( f \frac{L}{D} + \Sigma K \right) \frac{V}{2g_c} \rho$$

$$= \left( 0.039 \frac{259}{8} + 5 \right) \frac{(4.387)^2}{2(32.2)} (0.03) \frac{(3.28)^2}{2.2(25.4)}$$

$$= 0.0104 \text{ pulg de H}_2\text{O}$$

Entonces el tiro efectivo será

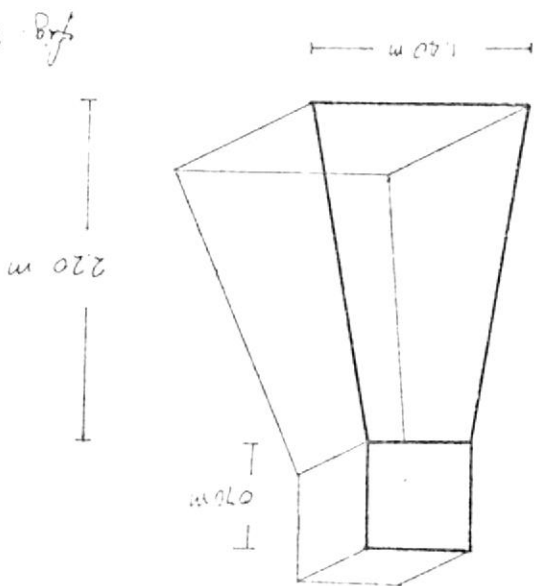
$$d_{\text{Ief}} = 0.0238 - 0.0104$$

$$= 0.0134 \text{ in de H}_2\text{O}$$

## 5.2. SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE

El suministro de combustible se hace desde una torre de 2.2 m (fig. 23) de alto donde se encuentra un depósito -

con visor de nivel para una capacidad de 66 galones. La alimentación o recarga del depósito se hace mediante una bomba desde el depósito general



Ver distribución esquemática del local.

### 5.3. SUMINISTRO DE AGUA

El suministro de agua está formado por un circuito cerrado, constituido por una torre de enfriamiento de 2000 galones por hora (lhr), un tanque calentador de presión de 60 galones, un sistema de carga como se indica en el plano 1, y un tanque recolector con capacidad de 60 galones. La circulación se realiza por medio de una bomba de 1670 galones por hora con una potencia aproximada de 0.5 HP.

## 6. PRESENTACION DE RESULTADOS

### 6.1. CONTORNO DE TEMPERATURAS EN LOS PLANOS CENTRALES: Horizontal

tal y vertical (en el sentido de la llama)

Como podemos apreciar en la figura 24 los contornos de temperatura en el plano horizontal, distinguiéndose

lóbulos lateralmente opuestos, en el primer tercio del túnel, que son la zona de mas alta temperatura, lo cual era de esperarse ya que el atomizador dispersa el combustible con un ángulo teórico de  $60^\circ$ . En el primer tercio también podemos distinguir una penetración de los contornos en el sentido axial del túnel, que nos demuestra el efecto producido por la entrada de mezcla fresca.

En los dos tercios del túnel tenemos una configuración uniforme demostrando así la gran homogeneidad de temperatura en esa región, con una pendiente promedio de  $25^\circ\text{C}$  ( $80^\circ\text{F}$ ) por decímetro, con esto podemos decir que el agrupamiento de líneas de contorno nos representa un aumento del gradiente de temperatura.

En la figura 25 donde se manifiestan los contornos de temperatura en el plano vertical centrado al túnel. En el primer tercio se aprecia iguales características que en la figura 24. A diferencia de las otras dos terceras partes donde se ve un cierto pronunciamiento de los contornos hacia la parte superior debido a la boyantez de los gases, también se puede apreciar un cierto retorno de los contornos hacia el final del túnel originados por el efecto de la chimenea.

En las figuras 24 y 25 se a puesto de manifiesto dos lóbulos casi colocados en forma simétrica pero de diferente magnitud lo cual se puede asumir que es debido a defecto del quemador que el cono de combustible atomizador no es homogéneo.

## 6.2. EFICIENCIA DE TRANSMISION

La eficiencia de transmisión está definida como la relación de la energía transmitida real a la energía disponible.

Para un tubo

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{15.612.1}{1.86 (130480)} \\ &= 0.0643 \\ \eta &= 6.43\%\end{aligned}$$

### 6.3. ANALISIS DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

En el análisis de los productos de la combustión realizado con el analizador de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  con lo cual lo único que es posible evaluar es la relación aire-combustible existente con la ayuda de la figura 20 donde se puede apreciar el exceso o deficiencia de aire con que opera la combustión.

Típicamente en los productos de la combustión - de un aceite combustible los compuestos que se hallan presentes son  $\text{CO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{N}_2$ .

Asumiendo combustión completa, el aire necesario por lb de combustible es de 14.99

Entonces la pérdida de calor es

$$\begin{aligned}Q_L &= 15.99 (0.25) (1923 - 90) \\ &= 7327.4 \text{ BTU}\end{aligned}$$

Luego el poder calorífico

$$\begin{aligned}H_{Rn} &= 18500 - | 1040 \text{ (peso del agua)} | \\ &= 18500 - | 1040 (0.130) 18 | \end{aligned}$$

Si tenemos 26% de H en peso

$$\begin{aligned}&= 18500 - 2433.6 \\ &= 16066.4 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{16066.4 - 7327.4}{18500} \times 100 \\ &= 47.24\%\end{aligned}$$

La combustión incompleta en este caso la cantidad de diesel que no se quema es 0.19 lb.

Entonces

$$\begin{aligned}
 Q_p &= 17068.5 (0.19) \\
 &= 3252.7 \\
 \eta &= \frac{16504.5 - 3252.7 - 7327.4}{18500} \times 100 \\
 &= 32.0\%
 \end{aligned}$$

## 7. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

### 7.1. EFICIENCIA DE COMBUSTION

La eficiencia de combustión se puede evaluar de una forma más realista si se determina con mayor exactitud los componentes presentes en los productos de la combustión.

Como se puede apreciar los resultados de la combustión son bajos, los que se pueden mejorar con un precalentamiento del aire de combustión y si es posible también el combustible.

Por otra parte la baja eficiencia debido a la combustión incompleta mejorando el sistema de mezcla aire-combustible.

### 7.2. EVALUACION DEL QUEMADOR

Para la evaluación del quemador partimos del aspecto cuantitativo de la eficiencia de combustión comparando entre la obtenida en condiciones reales de operación y la obtenida a partir de la combustión con la cantidad estequiométrica de aire-combustible.

En base a lo antedicho se puede decir que el quemador no tiene una eficiencia recomendable.

## CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES:

En los capítulos anteriores se ha hecho una presentación de los detalles de diseño, construcción y operación del horno experimental. Asimismo, se dejó una presentación y valúos de los resultados obtenidos. En el presente capítulo se procede entonces a hacer un recuento de las principales conclusiones y recomendaciones que se originan del presente proyecto.

A partir de los contornos de temperatura presentados anteriormente, se observa que el diseño geométrico es el apropiado, ya que podemos apreciar las dos zonas, que según el criterio de Bragg, deben existir para que se produzca una buena combustión. La primera de flujo perfectamente mezclado-PSR y la segunda una sección de flujo paralelo. Típicamente la zona PSR ocupa 1/3 de la cámara mientras que la región del flujo paralelo ocupa los otros dos tercios. Estas dos zonas podemos ver claramente en las figuras 24 y 25 por la presencia de curvas de contorno de curvatura pronunciada y un agrupamiento de las mismas, cubriendo aproximadamente 1/3 de la cámara y los otros 2/3 con curvas de contorno de curvatura armónica y un gradiente de temperatura moderado, dándonos con esto la existencia de una zona de flujo "paralelo".

Por otra parte el uso de piedra pomez o pumita ha sido un éxito como aislante respondiendo bien al objetivo propuesto.

La determinación del tiempo de calentamiento en hornos es de suma importancia, primero con él se lo-

gra control sobre el gradiente de temperatura manteniéndolo dentro de límites permisible en las paredes. Y en hornos experimentales debe ser el más corto posible para que responda con éxito a su objetivo. En el presente proyecto se ha demostrado el uso de un método práctico para su determinación.

También podemos concluir que a partir de las figuras 24 y 25 podemos evaluar las pérdidas en las paredes con una buena exactitud, haciendo un balance rápido de energía. Esto es muy importante para un horno experimental.

En cuanto a la eficiencia, primero la de combustión es bastante baja debido a la gran energía necesaria para precalentar la mezcla, y en cuanto a la de transmisión es bastante elevada ya que existe podríamos decir una llama brillante.

### RECOMENDACIONES

Aprovechar los gases de salida para precalentar la mezcla, con el fin de mejorar la combustión y consigo aumentar la temperatura de la cámara.

Medir con métodos más apropiados como el ORSAT, cromatografía de gases, etc., los gases de salida, para tener una conciencia más acertada de los constituyentes presentes en los gases de salida, y así hacer un mejor estudio de la eficiencia.

Colocar el piso de tubos de carga para evaluar su

efecto en el sistema.

Evaluar el quemador con aditivos en el combustible y sus efectos en el sistema. Esto es muy importante por la posibilidad del ahorro energético que el uso de aditivos en sistemas industriales podría representar.

Extender el estudio a otros tipos de combustibles, especialmente derivados residuales de petróleo, por medio de los cambios apropiados en el quemador y sistema de alimentación.

A P E N D I C E

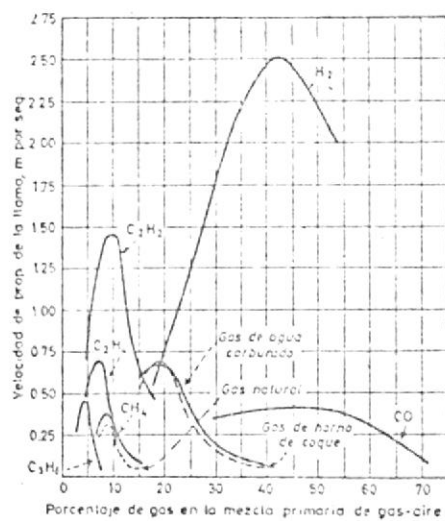
FIGURA # 1<sup>(3)</sup>

FIG. . Variación de la velocidad de propagación de la llama en las mezclas de gas-aire, a la presión atmosférica, con el contenido de gas.

FIGURA # 2(4)

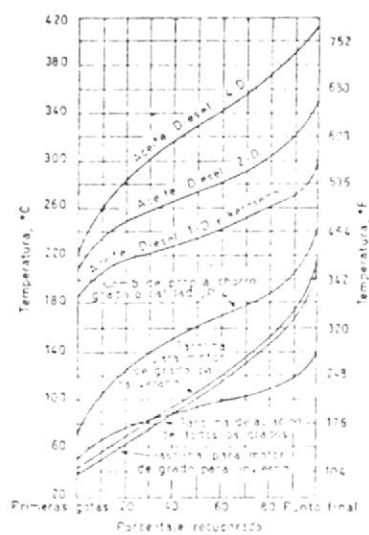


Fig. Curvas de destilación.

## Curvas de Destilación

FIGURA # 3<sup>(5)</sup>

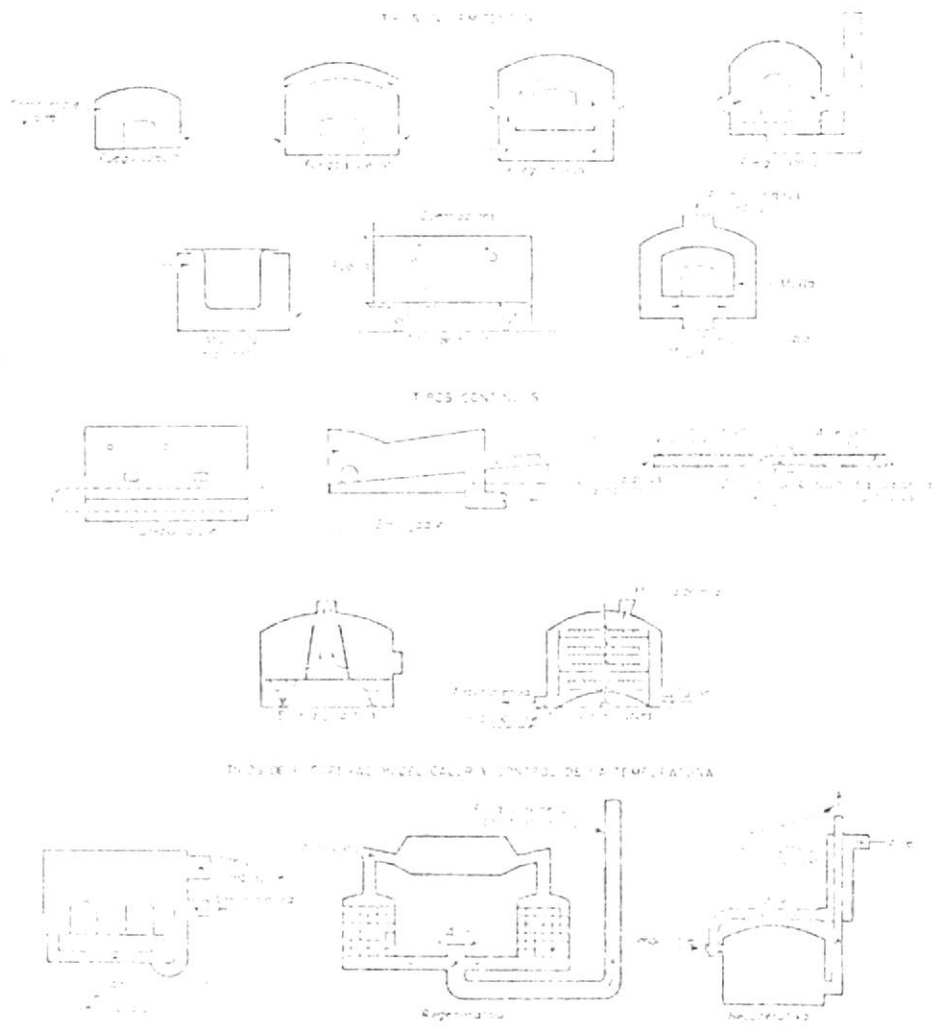
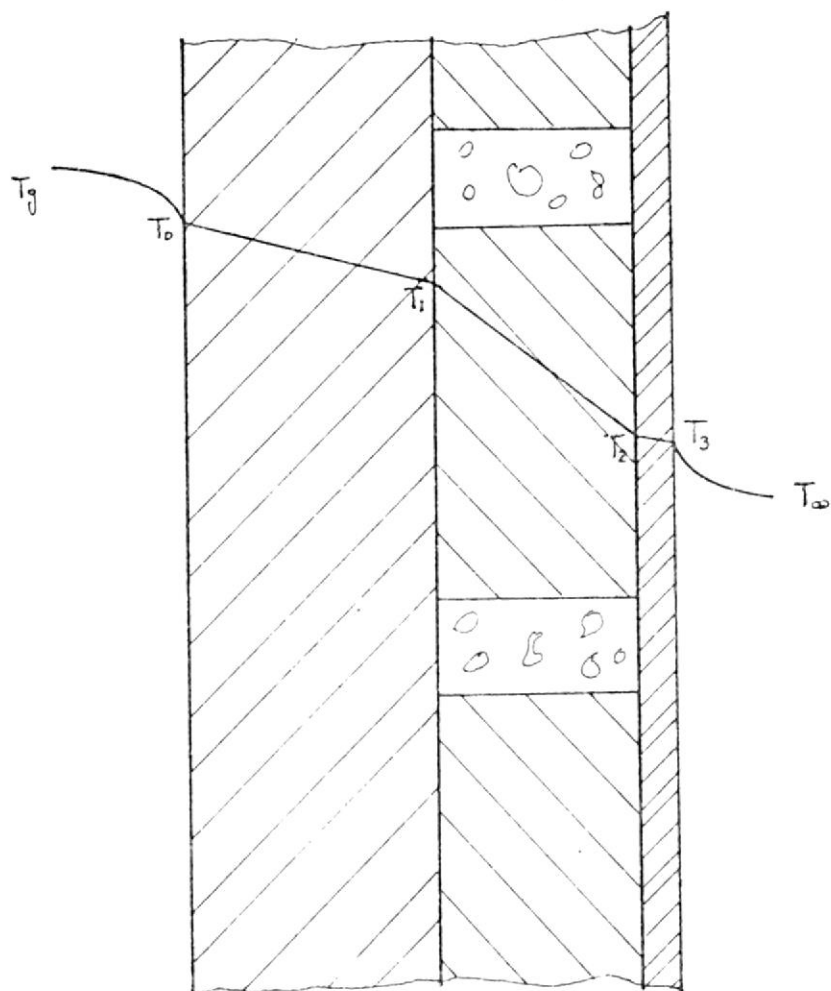


Fig. 3 Esquemas de varios hornos industriales.

FIGURA 4



Pared lateral

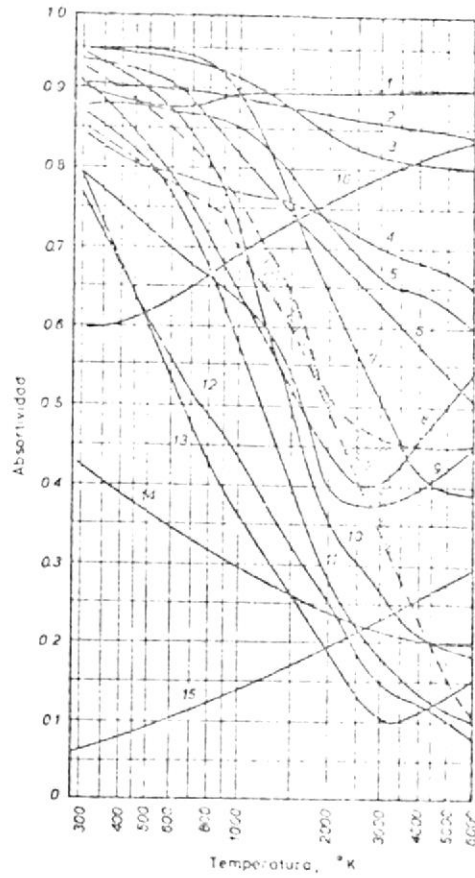
FIGURA # 5<sup>(5)</sup>

Fig. 5 Variación de la absorptividad con la temperatura. 1. Cubierta o tejado de pizarras. 2. Ladrillo, rojo cañ. 3. Láminas de asbesto. 4. Caucho blando, gris. 5. Hormigón. 6. Porcelana. 7. Esmalte vitreo, blanco. 8. Ladrillos rojos. 9. Corcho. 10. Tejas holandesas blancas. 11. Ladrillos de chimota, blancos. 12.  $\text{MgO}$  evaporado. 13. Aluminio anodizado. 14. Aluminio pintado. 15. Aluminio pulimentado. 16. Gófito. Las líneas de trazos comprenden los límites de los datos para ladrillo gris de pavimento, papel de asbesto, madera, diversas telas, yeso de París, litopon y papel.

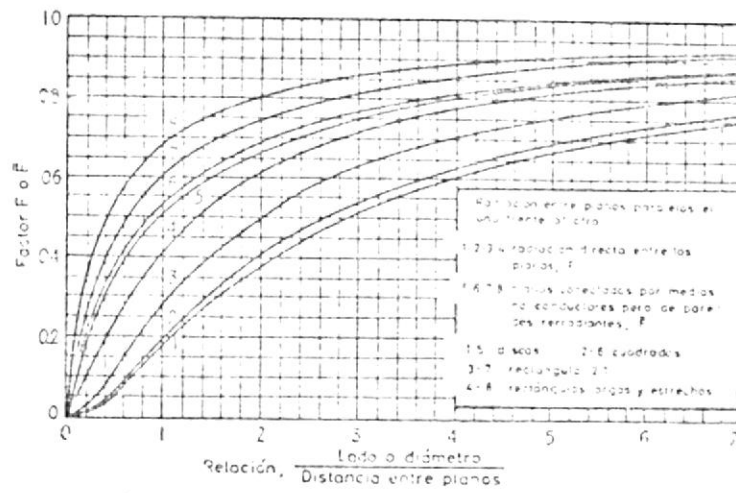
FIGURA # 6<sup>(2)</sup>FIG. 6 Factor  $F$  o  $\bar{F}$  para planos paralelos directamente enfrentados.

FIGURA # 7<sup>(2)</sup>

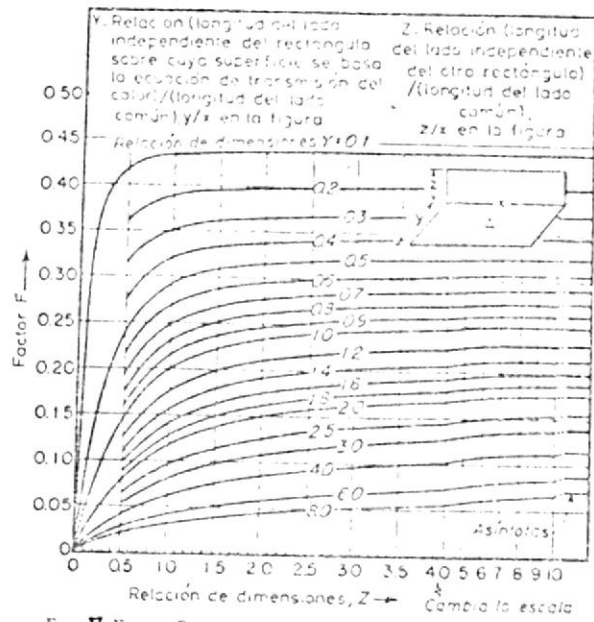
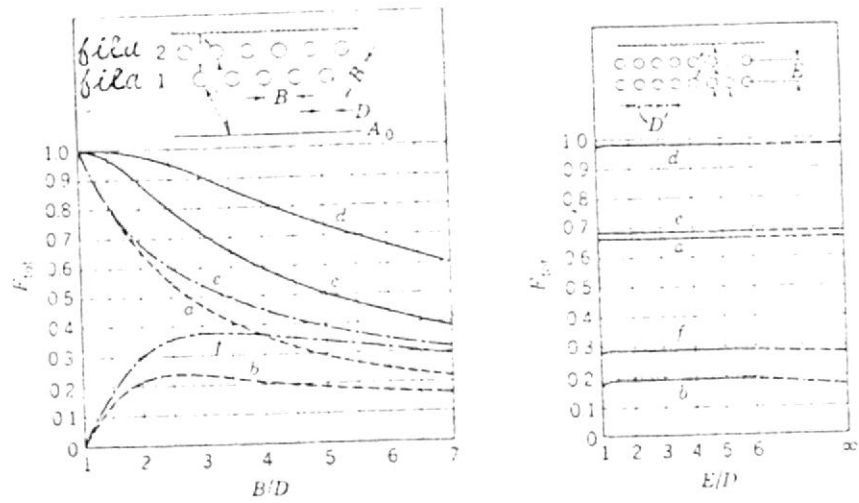


Fig. 7 Factor  $F$  para rectángulos adyacentes perpendiculares

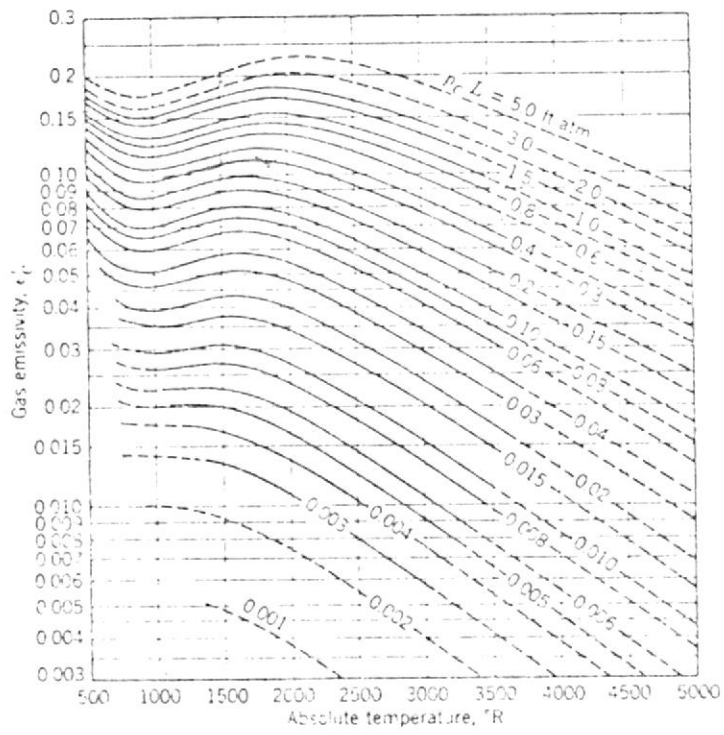
FIGURA # 8 y 9(6)



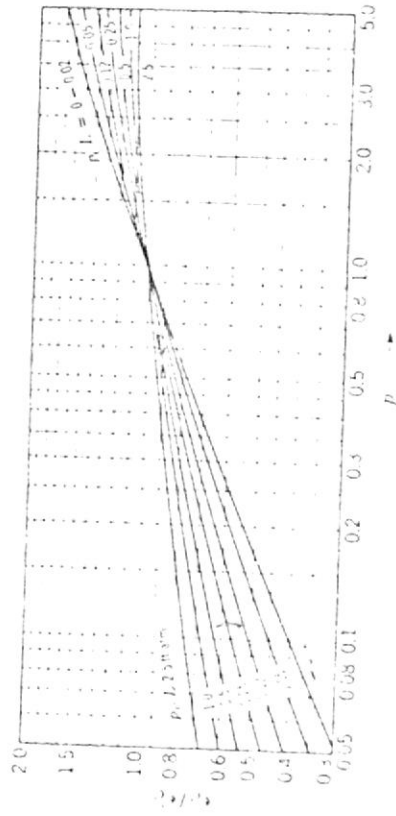
Valores de  $F_{tot}$  para un plano paralelo a hileras de tubos.

- a Directa para la primera hilera
- b Radiación directa para la segunda hilera
- c Total para una hilera, cuando solo hay una
- d Total para las dos hileras, cuando hay dos
- e Total para la primera hilera, cuando hay dos
- f Total para la segunda hilera, cuando hay dos

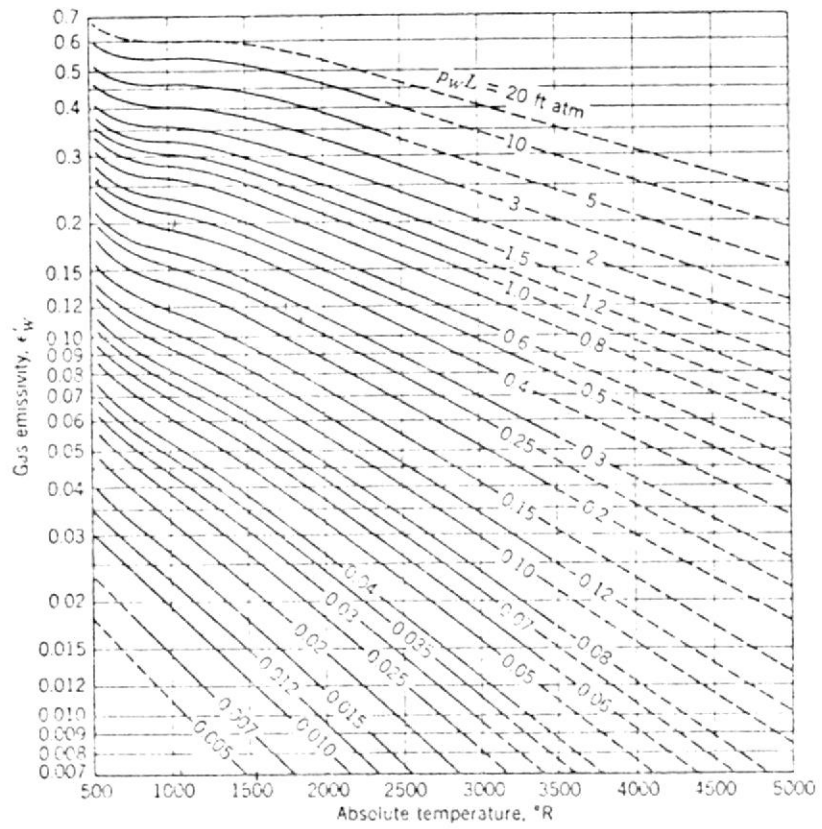
FIGURA 10(2)



Emisividad del bioxido de carbon

FIGURA 11<sup>(2)</sup>

Corrección por el efecto de la presión total sobre la radiación de  $\text{CO}_2$

FIGURA 12<sup>(2)</sup>

Emisividad del vapor de agua

Corrección por los efectos de la presión total y de la presión parcial sobre la radiación del vapor de agua.

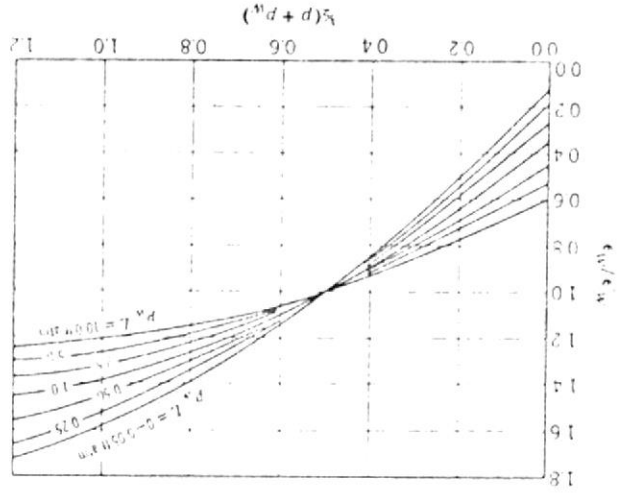
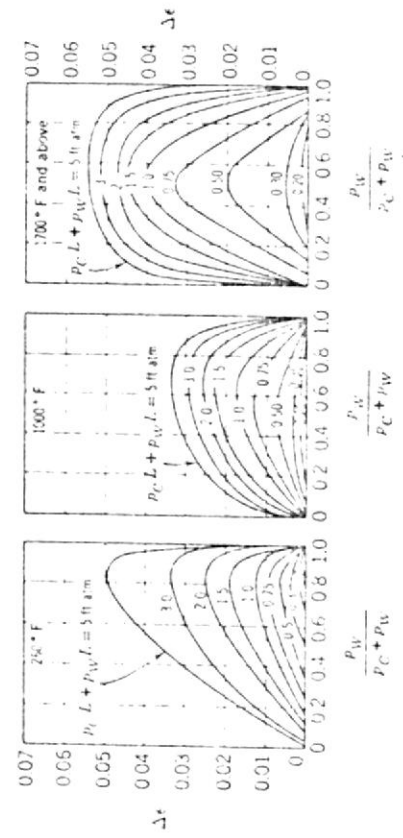


FIGURA 13 (2)

FIGURA 14 (2)



Corrección por radiación superpuesta para mezclas de  $\text{CO}_2$  y vapor de agua.

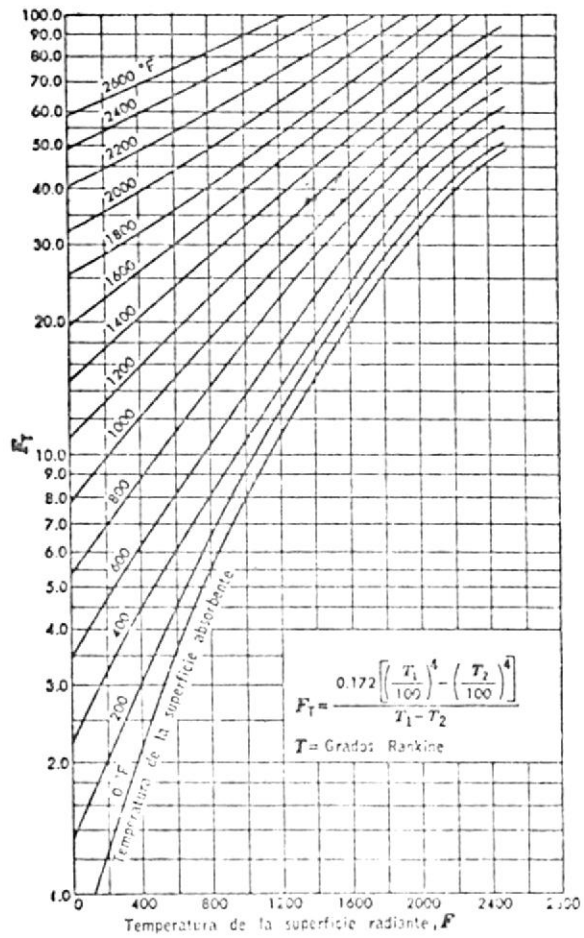
FIGURA # 15<sup>(2)</sup>

FIGURA 15. Factor de temperatura  $F_T$ , como función de la temperatura, en grados Fahrenheit.

FIGURA # 16

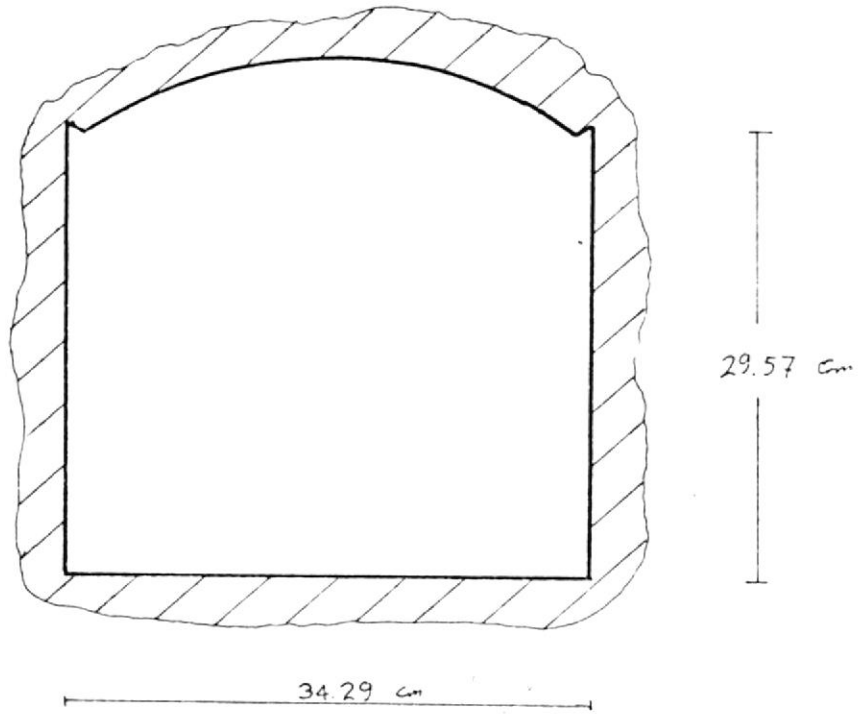
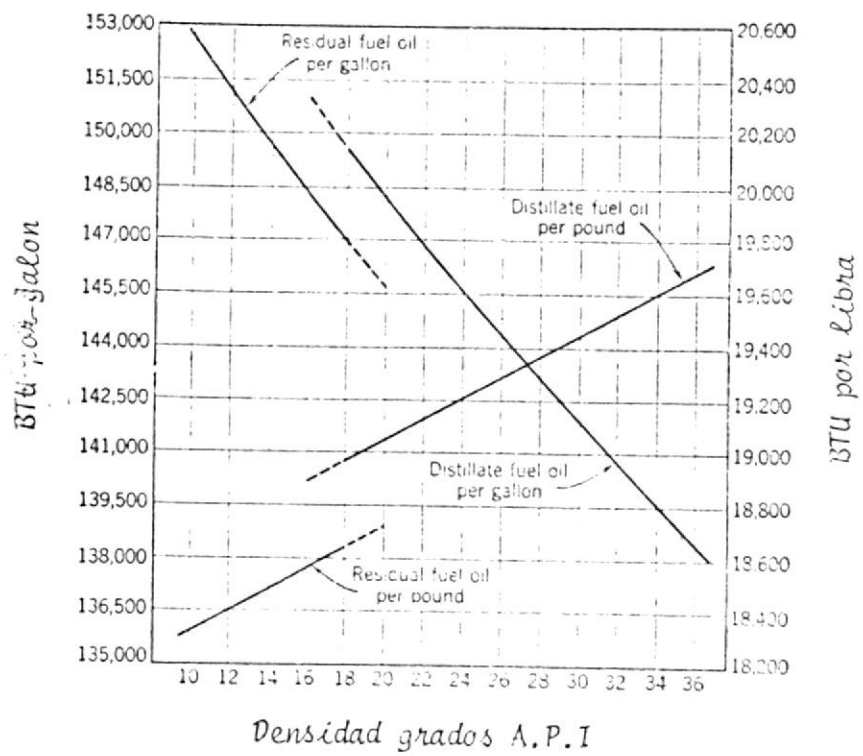
*Sección transversal del tunel*

FIGURA # 17 <sup>(5)</sup>

Determinación del poder calorífico a partir de la densidad en grados A.P.I

FIGURA # 18

PARA:

AX 0.9"

 $C_p$  0.136 BTU/lb $\cdot$ °F $k$  0.5295 BTU/h- $\delta t$ -°F $p$  90 lb/ $\delta t^3$ 

$$\frac{0.136(90)0.81}{2(0.5295)144}$$

 $\dot{A}_0$ 

0.065 h

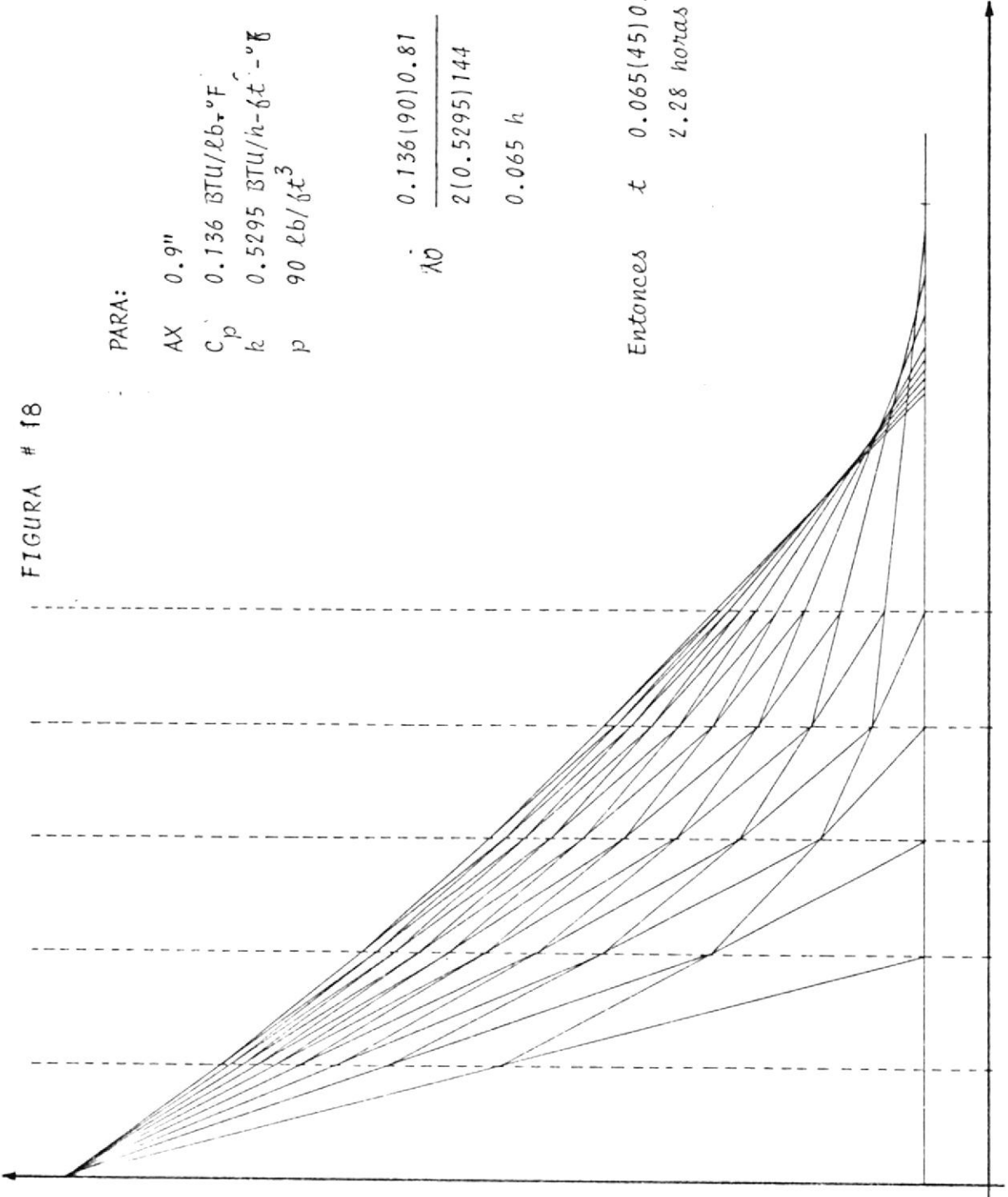
Entonces  $t$  0.065(45)0.9  
2.28 horas

FIGURA # 19

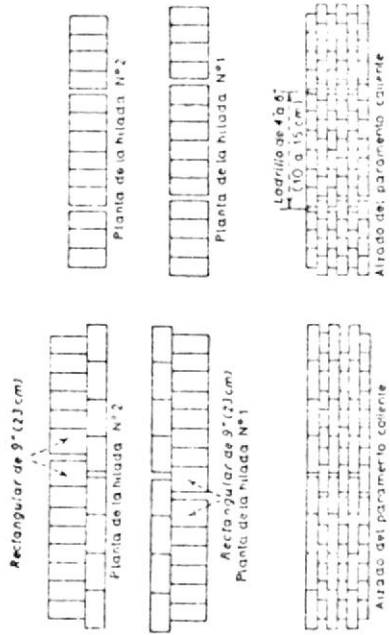


FIG. 18 Juntas de dilatación.

Porcentaje de  $O_2$  en la combustión

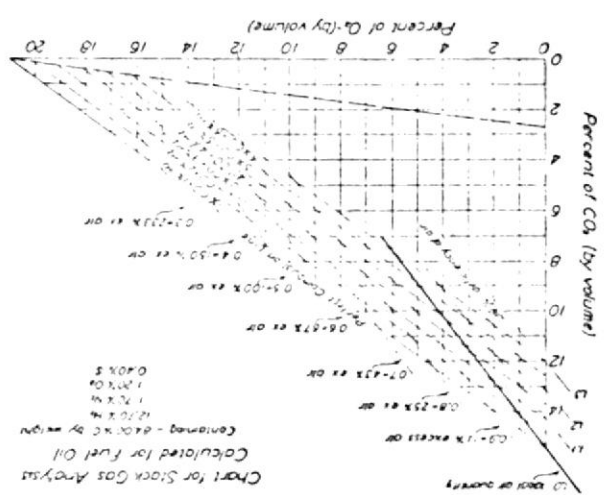


FIGURA # 20

FIGURA # 21

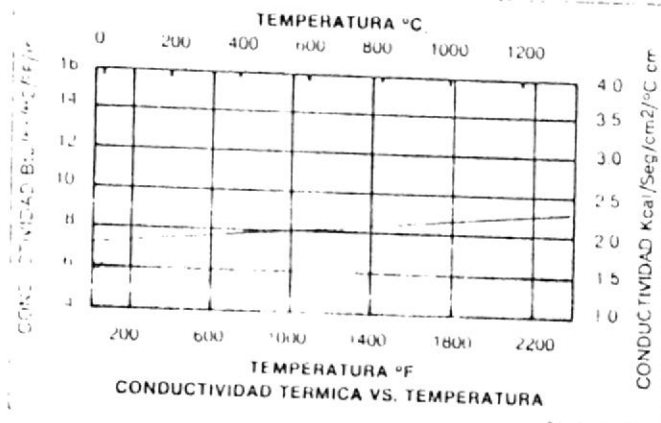


FIGURA # 21 A

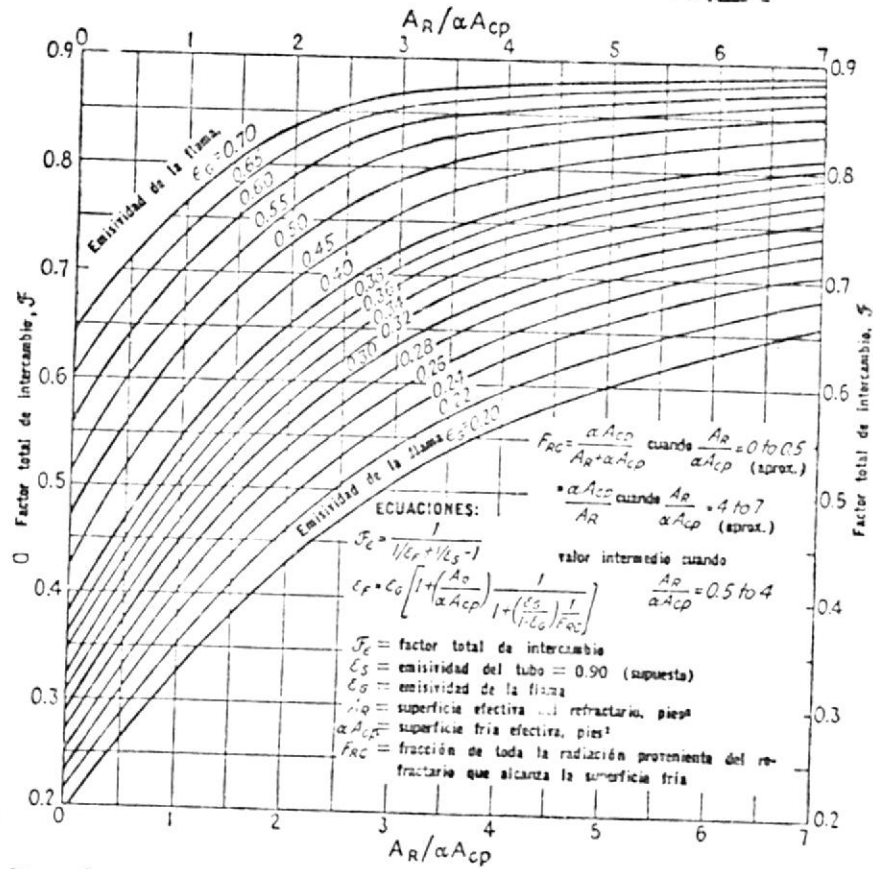
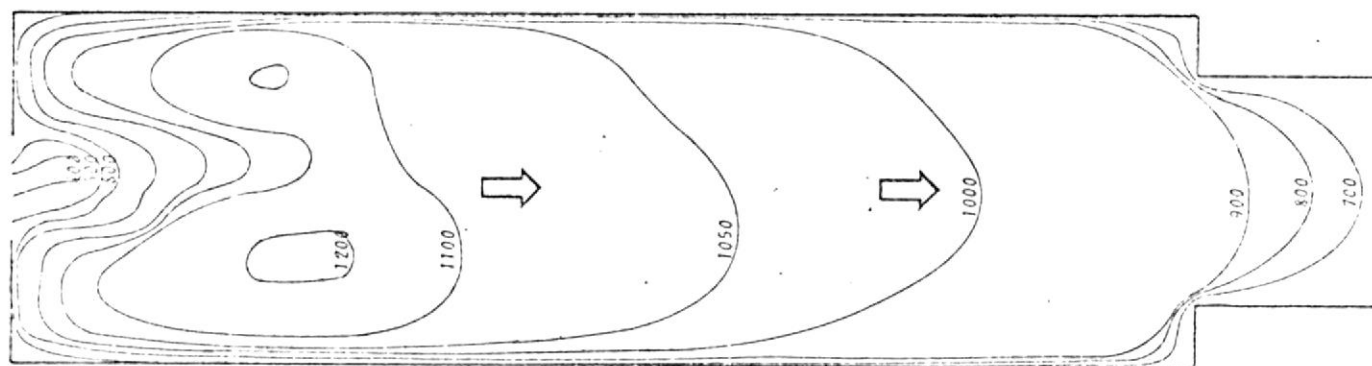


Fig. 21 Factor total de intercambio térmico para secciones radiantes

FIGURA

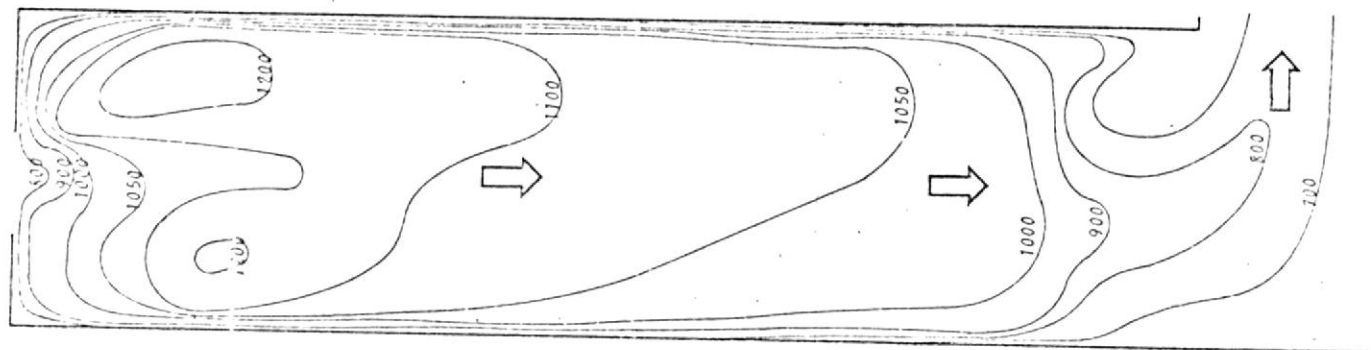
24



CONTORNO DE TEMPERATURA EN EL PLANO CENTRAL HORIZONTAL

TEMPERATURA EN °C

FIGURA 25



5 cm.  
25 cm.

CONTORNO DE TEMPERATURA EN EL PLANO CENTRAL VERTICAL

TEMPERATURA EN °C

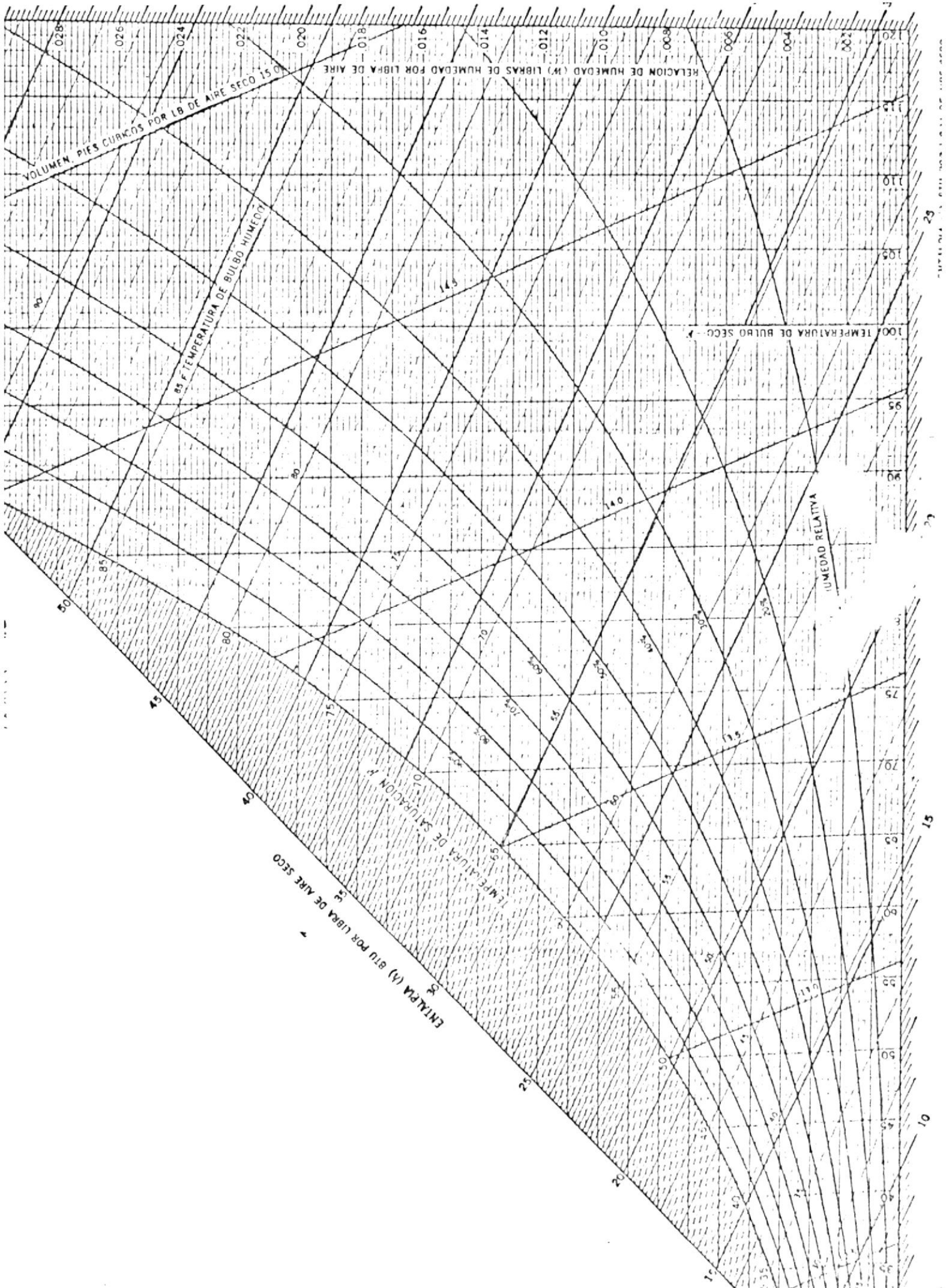
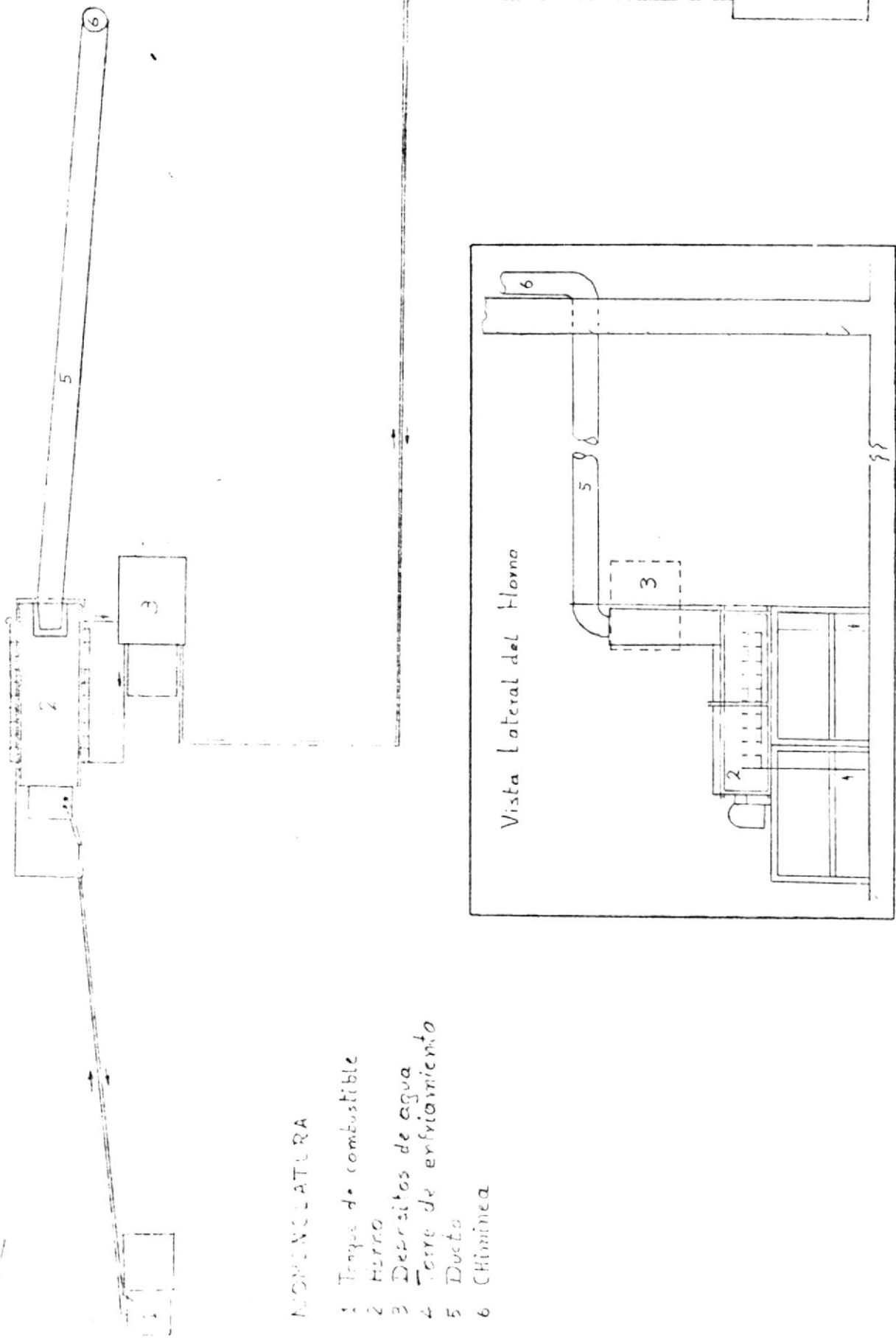


FIGURA # 27



NOVENCLATURA

- 1 Tanque de combustible
- 2 Horno
- 3 Depositos de agua
- 4 Torre de enfriamiento
- 5 Ducto
- 6 Chimenea

Vista Lateral del Horno

Dibujo esquemático del horno

FIGURA # 28

- 1 DEPS. DE COMBUSTIBLE
- 2 HORNO
- 3 DEPS. DE AGUA
- 4 CHIMENEA
- 5 TORRE DE ENFRIAMIENTO

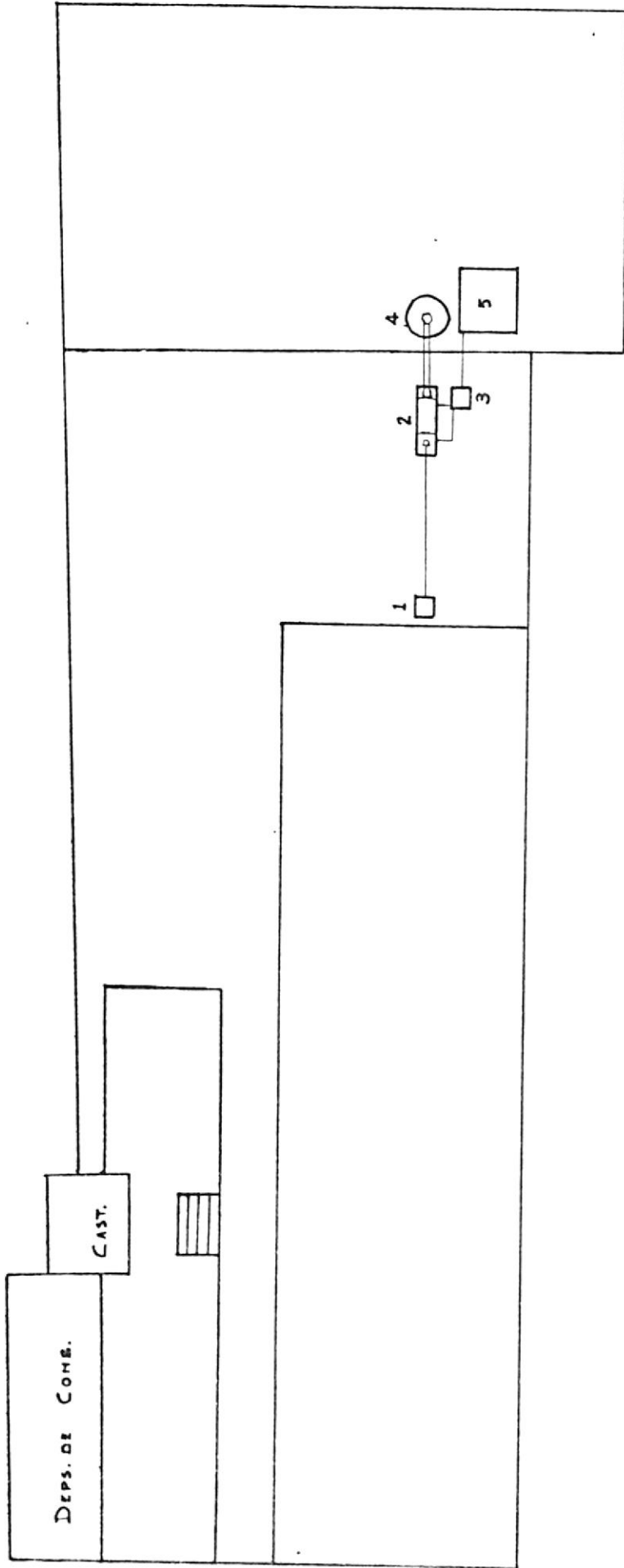


TABLA # 1(4)

Tabla 1 Análisis y poder calorífico superior de petróleos crudos, destilados típicos y aceites combustibles

Producto	Densidad, A.P.I.	Densidad específica a 15.5°C.	Peso por galón		Potencia calorífica superior Cal. por Kg	Análisis último, porcentajes				
			Lbs.	Kg.		C	H	S	N	O
Petróleo crudo de California	22.8	0.917	7.676	3.463	10,566	84.90	12.70	0.75	1.70	1.20
Petróleo crudo de Kansas	22.1	0.921	7.671	3.479	10,623	84.15	13.09	1.90	0.45	
Petróleo crudo de Oklahoma	31.3	0.869	7.236	3.262	10,834	85.73	13.11	0.40	0.70	
Petróleo crudo de Oklahoma	31.0	0.871	7.233	3.266	10,825	85.09	12.90	0.76		
Petróleo crudo de Pensilvania	42.6	0.813	6.784	3.029	10,956	86.05	13.83	0.96	0.60	0.60
Petróleo crudo de Texas	33.2	0.875	7.196	3.305	11,011	85.95	12.50	1.75	0.50	0.60
Petróleo crudo de Wyoming	31.5	0.868	7.133	3.270	10,839					
Petróleo crudo de México	13.6	0.975	8.123	3.633	10,419	83.70	10.20	4.15		
Gasolina	67.6	0.713	5.935	2.692		84.5	15.7			
Gasolina	60.0	0.739	6.152	2.791	11,526	84.90	15.76	0.08		
Mezcla de gasolina y benceno	46.3	0.796	6.627	3.006		83.3	11.7			
Keroseno	41.3	0.819	6.816	3.083	11,005					
Acete de gas	32.5	0.863	7.186	3.260	10,667					
Acete combustible (México)	11.9	0.937	8.229	3.729	10,283	84.02	10.06	4.93		
Acete combustible (América Central)	27.1	0.892	7.428	3.359	10,764	85.62	11.93	0.35	0.50	0.60
Acete combustible (California)	16.7	0.954	7.956	3.609	10,464	84.67	12.36	1.16		

TABLA # 2

Tabla Potencias caloríficas de los aceites de petróleo

Grados API. a 15.5° C.	Densidad específica *	Potencia calorífica superior a vo- lumen constante $Q_v$ , Cal.		Potencia calorífica inferior a pre- sión constante $Q_s$ , Cal.	
		Por Kg	Por litro	Por Kg	Por litro
10	0.9088	10 300	10 295	9 745	9 735
20	0.9329	10 565	9 860	9 960	9 295
30	0.8751	10 790	9 440	10 140	8 875
40	0.8241	10 970	9 040	10 285	8 475
50	0.7787	11 120	8 660	10 400	8 100
60	0.7380	11 255	8 310	10 500	7 750
70	0.7014	11 365	7 975	10 565	7 490
80	0.6682	11 460	7 665	10 655	7 125

\* Los valores de esta columna son valores verdaderos o absolutos obtenidos corrigiendo todos los pesos por el empuje del aire. Los valores dados en la página 67 son para pesos en atmósfera normal.

TABLA # 3

Tabla . Calor latente de vaporización de los productos del petróleo

Producto	Densidad	Temperatura media de ebullición, grados C.	Calor de vaporización	
	Grados A.P.I.		Cal./Kg	Cal./litro
Gasolina . . . . .	60	138	64	47.6
Nafta . . . . .	50	171	57	44.6
Keroseno . . . . .	40	226	48	39.6
Aceite combustible . . . . .	30	304	37	32.6

TABLA # 4

Tabla 4 Especificaciones para los aceites combustibles Diesel

Ensayo	Método ASTM	Grado de combustible Diesel *			Especificaciones militares de los EE. U.U. MIL-F-16884B
		1-D	2-D	4-D	
		Límite			
Punto de inflamación, mín., grados C. . . . .	D93-52	38 ó el legal	52 ó el legal	54 ó el legal	65
Agua y sedimento, máx., por ciento en volumen . . . . .	D96-52T	Trazas	0.10	0.5	Trazas
Viscosidad, seg., SSU, 100° F. (38° C.) . . . . .	D88-53	1.4*	32	45	33
Mínima . . . . .			45	125	45
Máxima . . . . .					
Residuo de carbón, por ciento en peso máx. . . . .	D524-52T	0.15	0.35	.....	0.20
Ceniza, por ciento en peso, máx. . . . .	D482-46	0.01	0.02	0.10	0.005
Punto de fluidez, grados C. máx. . . . .	D97-47	†	†	†	0
Azufre, por ciento en peso, máx. . . . .	D129-52	0.50	1.0	2.0	1.0
Calidad de ignición					
Número de cetano, mín. . . . .	D613-48T	40	40	30	47
Corrosión a 100° C., tira de cobre, máx. . . . .	D130-30	Nº 3	Nº 3	.....	Pasa
Temperatura de destilación del 90 por ciento, grados C., máx. . . . .	D158-54	.....	357	.....	357
Punto final, grados C., máx. . . . .	D36-54	329			385

\* Viscosidad cinemática, centistokes.

† Para trabajo en tiempo frío, deberá especificarse el punto de fluidez 5.5° C. por debajo de la temperatura ambiente a la que haya de trabajar el motor, excepto cuando se disponga de medios para calentar el combustible.

TABLA # 5<sup>(8)</sup>

Tabla Clasificación de los carbones por su clase\*  
(C. F. = carbono fijo; M. V. = materia volátil)

Clase	Grupo	Límite de carbono fijo o Cal. por Kg base "libre de materia mineral"	Propiedades físicas de requisito
I. Antracítico	1. Metaantracita	C. F. seco, 93 por ciento o más (M. V. seca, 2 por ciento o menos)	No aglomerante <sup>6</sup>
	2. Antracita	C. F. seco, 92-93 por ciento (M. V. seca, 3-2 por ciento)	
	3. Semiantracita	C. F. seco, 86-92 por ciento (M. V. seca, 14-8 por ciento)	
II. Bituminoso <sup>4</sup>	1. Contenido bajo de materia volátil	C. F. seco, 78-86 por ciento (M. V. seca, 23-14 por ciento)	Ya sea aglomerante o sin acción de la intemperie <sup>7</sup>
	2. Contenido medio de materia volátil	C. F. seco, 69-73 por ciento (M. V. seca, 31-22 por ciento)	
	3. Contenido alto de materia volátil A	C. F. seco, menos de 69 por ciento (M. V. seca más de 31 por ciento); y húmedo*, 7 750* Cal./Kg o más	
	4. Contenido alto de materia volátil B	Húmedo*, 7 220-7 750* Cal./Kg	
	5. Contenido alto de materia volátil C	Húmedo, 6 100-7 220* Cal./Kg	
III. Subbituminoso	1. Subbituminoso A	Húmedo, 6 100-7 220* Cal./Kg	Tanto con acción de la intemperie como no aglomerante
	2. Subbituminoso B	Húmedo, 5 275-6 100* Cal./Kg	
	3. Subbituminoso C	Húmedo, 4 610-5 275* Cal./Kg	
IV. Lignítico	1. Lignito	Húmedo, menos de 4 610 Cal./ Kg	Compactado
	2. Carbón pardo	Húmedo, menos de 4 610 Cal./ Kg	Sin compacto

\* Esta clasificación no incluye unos cuantos carbones que tienen propiedades físicas y químicas poco comunes y que caen dentro de los límites de carbono fijo o Calorías de las clases bituminoso y subbituminoso de alto contenido de materia volátil. Todos estos carbones contienen ya sea no más de 43 por ciento de carbono fijo seco libre de materia mineral o tienen más de 4 610 Calorías por Kg. sobre la base "libre de materia mineral", en húmedo.

<sup>4</sup> Si son aglomerantes, se clasifican en el grupo de contenido bajo de materia volátil de la clase bituminoso.

<sup>5</sup> Las calorías en húmedo se refieren al carbón que contiene su humedad natural del nacimiento, pero no se incluye el agua visible presente sobre la superficie del carbón.

<sup>6</sup> Se reconoce que puede haber variedades que no se aglomeren en cada grupo de la clase bituminosa.

<sup>7</sup> Los carbones que tengan 69 por ciento o más de carbono fijo sobre la base "seca", y libre de materia mineral, se clasificarán de acuerdo con el contenido de carbono fijo, sin considerar las Calorías/Kg.

<sup>8</sup> Hay tres variedades del carbón del grupo C de alto contenido de materia volátil, bituminoso: variedad 1, aglomerante y sin acción de la intemperie; variedad 2, aglomerante y con acción de la intemperie; variedad 3, no aglomerante y sin acción de la intemperie.

TABLA # 6

Tabla Especificaciones estándares para la antracita

Tamaño	Tamaño de la criba (acuñeros redondos)		Tamaño superior al nominal máx. porcentaje	Tamaño inferior al nominal		Máxima de impurezas		
	Pasan a través de, pulgadas	Quedan arriba de, pulgadas		Máx. † porcentaje	Mín. porcentaje	Pizarra* porcentaje	Esquisto* porcentaje	O bien cenizas* (base seca)
Quebrado . . . . .	4 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{4}$ -3		15	7 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	2	11
Huevo . . . . .	3 $\frac{1}{4}$ -3	2 $\frac{1}{16}$	5	15	7 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	2	11
De estufa . . . . .	2 $\frac{1}{16}$	1 $\frac{1}{8}$	7 $\frac{1}{2}$	15	7 $\frac{1}{2}$	2	3	11
Nuez . . . . .	1 $\frac{1}{8}$	1 $\frac{1}{16}$	7 $\frac{1}{2}$	15	7 $\frac{1}{2}$	3	4	11
Chicharo . . . . .	1 $\frac{1}{16}$	1 $\frac{1}{16}$	10	15	7 $\frac{1}{2}$	4	5	12
Alforfón ( <i>buckheat</i> ) Nº 1 . . . . .	1 $\frac{1}{16}$	2 $\frac{1}{16}$	10	15	7 $\frac{1}{2}$			13
Arroz . . . . .	2 $\frac{1}{16}$	2 $\frac{1}{16}$	10	17	7 $\frac{1}{2}$			13
Cebada . . . . .	3 $\frac{1}{16}$	3 $\frac{1}{16}$	10	20	10			15
Nº 4 . . . . .	3 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{4}$	20	30	10			15
Nº 5 . . . . .	3 $\frac{1}{4}$	...	30					16
				No hay límite				

\* Cuando el contenido de pizarra en los tamaños quebrados a nuez, inclusive, es menor que en los estándares anteriores, el contenido de esquisto puede ser aumentado en una y media vez la disminución del contenido de pizarra bajo los límites admisibles; pero el contenido de pizarra especificado arriba no debe ser excedido en ningún caso.

Pizarra es un material que tiene menos de 40 por ciento de carbono fijo.

Esquisto es un material que contiene 40 por ciento o más, pero menos del 75 por ciento de carbono fijo.

La antracita con el contenido de cenizas arriba indicado o bien el contenido de pizarra o esquisto, se considera estándar en cuanto a impurezas.

† Se permitirá un margen o tolerancia del 1 por ciento en el porcentaje máximo de tamaño inferior al nominal y en el porcentaje de cenizas. El porcentaje máximo de tamaño inferior al nominal solo es aplicable a la antracita entrecada tal como sale de la instalación o planta preparadora.

TABLA # 7

Tabla Análisis de coques

Clase de proceso	Base "tal como se recibió"									
	Análisis inmediato, porcentaje				Análisis último, porcentaje				Potencia calorífica superior, Cal. por Kg.	
	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Cenizas	Hidrógeno	Carbono	Nitrógeno	Oxígeno		Azufre
Coque de hornos con aprovechamiento de subproductos . . . . .	0.8	1.4	87.1	10.7	0.8	85.0	1.3	1.2	1.0	7049.3
Coque de hornos de columna . . . . .	0.5	1.8	96.0	11.7	0.8	84.4	1.2	0.9	1.0	6938.7
Coque de baja temperatura . . . . .	0.0	9.8	83.5	6.7	3.2	84.2	1.9	3.2	0.8	7293.6
Coque de baja temperatura . . . . .	2.8	15.1	77.1	10.0	3.5	74.5	1.6	8.6	1.8	6999.3
Coque de alquitran . . . . .	0.2	1.1	97.6	1.0	0.6	96.6	0.7	0.6	0.5	8230.9
Coque de petróleo . . . . .	1.1	7.0	90.7	1.2	3.3	84.8	0.8	3.1	0.8	8365.8
Coque fluido . . . . .	0.3	...	...	0.3	4.4	87.0	1.9	3.2	5.2	8833.1
Coque fluido . . . . .	0.3	6.8	92.6	0.3	...	...	...	...	5.1	7838.7

TABLA # 8 (8)

Tabla Análisis y potencias caloríficas altas de turba secada al aire  
(Oficina de Minería de los Estados Unidos)

Clase de turba	Localidad	Elementos constitutivos, por ciento			Potencia calorífica alta, Cal por Kg	
		Agua	Ceniza	Azufre	Secada al aire	Libre de agua
Parda, fibrosa . . . . .	Hampden, Mich.	7.50	1.55	0.28	5 070	5 370
Parda clara, fibrosa . . . . .	Rochester, N.H.	11.64	4.06	0.22	5 016	5 710
Parda oscura . . . . .	Westport, Conn.	12.70	4.02	0.24	4 772	5 186
Parda sin estructura . . . . .	New Durham, N.H.	6.06	12.92	0.33	4 413	4 777
Parda . . . . .	New Fairfield, Conn.	9.63	7.93	0.16	4 367	4 532
Parda, fibrosa . . . . .	Westport, Conn.	19.69	3.23	0.19	4 273	5 321
Parda, fibrosa . . . . .	Cicero, N.Y.	14.57	7.42	0.25	4 269	4 927
Parda, fibrosa . . . . .	Black Lake, N.Y.	8.63	13.61	0.99	4 179	4 779
De pantano salino . . . . .	Kittery, Maine	13.50	12.04	1.94	4 066	4 701
Negra . . . . .	Greenland, N.H.	6.62	21.11	1.01	3 992	4 255
Parda, fibrosa . . . . .	Madison, Wis.	6.99	13.77	0.38	3 857	4 233

TABLA # 9

Tabla . Análisis de las maderas combustibles, tal como se quemán  
(porcentajes)

Elemento constituyente	Madera típica no re- siosa, curada	Cebón de madera, saúce	Desperdicios de madera			Combus- tible de madera, trun- ca Abeto Douglas	Sereno, verde, abeto Douglas	Trun- cos de saúce, abeto Douglas	Corteza típica
			Secoya de Ca- lifornia	Abeto tsuea del occí- dente	Abeto Douglas				
Análisis inmediato									
Humedad . . . . .	24.0	3.2	50.4	57.9	35.9	47.2	44.0	10.3	71.8
Materia volátil . . . . .	65.5	14.7	40.9	31.3	22.5	42.0	44.9	78.3	22.4
Carbono fijo . . . . .	9.5	20.2	8.6	9.9	11.1	8.9	9.5	11.2	4.5
Cenizas . . . . .	1.0	1.9	0.1	0.9	0.5	1.0	0.7	0.2	1.3
Análisis último									
Hidrógeno . . . . .	7.2	2.7	8.5	8.9	8.0	.....	.....	.....	0.6
Carbono . . . . .	37.9	85.0	26.5	21.2	33.5	.....	.....	.....	14.2
Nitrógeno . . . . .	0.1	0.2	0.1	0	0.1	.....	.....	.....	0
Oxígeno . . . . .	23.8	10.1	64.8	69.0	57.0	.....	.....	.....	74.0
Azufre . . . . .	0	0.1	0	0	0	.....	.....	.....	0
Cenizas . . . . .	1.0	1.9	0.1	0.9	0.5	.....	.....	.....	1.3
Poder calórico supe- rior, Cal. por Kg	3 500	7 515	2 540	2 015	3 220	2 595	2 728	4 316	1 445

TABLA # 10(8)

Tabla Valor combustible del bagazo verde de trapiche

Por ciento de extracción del peso de caña	Por ciento de humedad contenida en el bagazo		C.I. por Kg disponibles para la generación de vapor		Kg de bagazo equivalentes a 1 Kg de carbon mineral de 7 775 Cal.	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
75	42.64	51.03	2.290	1.630	1.30	4.25
77	43.22	48.07	2.456	2.016	3.13	3.26
79	43.75	44.84	2.706	2.209	2.67	3.52
81	44.24	40.18	2.927	2.440	2.61	3.19
83	44.72	35.80	3.310	2.760	2.15	2.80
85	45.20	28.34	3.741	3.038	2.08	2.52

(a) Basados en caña tropical de 12 por ciento de fibra y jugo que contienen 18 por ciento de materia sólida.

(b) Basados en caña de Louisiana de 10 por ciento de fibra y jugo que contienen 15 por ciento de materia sólida.

TABLA II

RESULADOS	N		G		L		O		U		I		F			
	GASOLINA REGULAR	GASOLINA ESPECIAL	TURBO	KEREX	DIESEL	DIESEL	RESIDUO	GASOLINA ESPECIAL	KEREX	DIESEL	DIESEL	RESIDUO	GASOLINA ESPECIAL	KEREX	DIESEL	RESIDUO
Gravedad Especifica a 60°F	0.7260	0.7258	0.8020	0.8120	0.8500	0.8500	0.9500	0.7274	0.8140	0.8470	0.8470	0.9470	0.7274	0.8140	0.8470	0.9470
Color Saybolt		Verde	25					Verde	Rojo	1.0			Verde	Rojo	1.0	
Color ASTM	Azul		106	110	184.0	280		132		170.0	220		132		170.0	220
Punto Inflamación TAC °F					20.0	70					50					50
Punto Inflamación P.M. °F					40.0					39.0					39.0	
Punto Congelación °F																
Viscosidad Saybolt a 100°F Sgdo.						3.310										
Viscosidad Redwood a 100°F Sgdo.																
Presión Vapor Red. a 100°F Lbs/Pulg <sup>2</sup>	10.0	10.0					9.4									
Cebillaje	64.0	80.0					80.0									
Asfalto % V.						1.38										1.30
Asfalto por Destilación % V.						0.1										TRAZOS



DETERMINACION AVIZ

P.I.E. °C	35.0	34.0	150.0	152.0	204.0		32.0	170.0	194.0
Volúmen a 100°C %	36.0	37.5	55.0	36.0	61.0		33.0	30.0	64.0
Volúmen a 200°C %									
Volúmen a 300°C %									
5 % Volúmen a °C	52.0	50.0	100.0	107.0	230.0		48.0	180.0	210.0
10 % Volúmen a °C	62.0	61.0	168.0	173.0	241.0		60.0	186.0	222.0
50 % Volúmen a °C	110.0	110.0	195.0	212.0	288.0		114.0	214.0	278.0
80 % Volúmen a °C	154.0	155.0	225.0	246.0	340.0		158.0	250.0	340.0
90 % Volúmen a °C	167.0	168.0	233.0	252.0	362.0		172.0	260.0	362.0
P.F.M. °C	180.0	181.0	241.0	265.0	380.0		186.0	275.0	380.0
Recorrido	97.0	97.0	98.5	98.5	98.0		96.5	98.5	98.0
Pérdida	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0		1.0	1.5	1.5
Pérdida	2.0	2.0					2.5		

TABLA 12 EMISIVIDAD NORMAL TOTAL DE VARIAS SUPERFICIES (HOTTEL) A. METALES Y SUS OXIDOS

Superficie	t, °F *	Emisividad *
<b>Acero (Véase Hierro y Acero)</b>		
<b>Aluminio</b>		
Placa muy pulida, 98.3% de pureza .....	410-1070	0.039-0.057
Placa pulida .....	73	0.040
Placa áspera .....	78	0.055
Oxidada a 1110°F .....	390-1110	0.11-0.19
Techados de aluminio .....	100	0.216
<b>Superficies calorizadas, calentadas a 1110°F</b>		
Cobre .....	390-1110	0.18-0.19
Acero .....	390-1110	0.52-0.57
<b>Cobre</b>		
Cobre electrolítico cuidadosamente pulido ...	176	0.018
Comercial esmerilado, pulido, algo poroso ....	66	0.030
Comercial, brillante pero no al espejo .....	72	0.072
Pulido .....	212	0.023
Placa, calentada largo tiempo, cubierta con gruesa capa de óxido .....	77	0.78
Placa calentada a 1110°F .....	390-1110	0.57-0.57
Oxido cuproso .....	1470-2010	0.66-0.54
Cobre fundido .....	1970-2330	0.16-0.13
<b>Cromo (véase Niquel, Aleaciones para Aceros Ni-Cr)</b>		
Estañó, lámina de hierro con estañado brillante ..	76	0.043 y 0.064
<b>Hierro y acero</b>		
<b>Superficies metálicas (capa de óxido muy delgada)</b>		
Hierro electrolítico, altamente pulido .....	350-440	0.052-0.064
Hierro pulido .....	800-1880	0.144-0.377
Hierro recién esmerilado .....	68	0.212
Hierro vaciado pulido .....	392	0.21
Hierro forjado, muy pulido .....	100-480	0.28
Hierro vaciado, recién torneado .....	72	0.435
Piezas de acero pulidas .....	1420-1900	0.52-0.56
Solera de fondo, de acero .....	1720-2010	0.55-0.61
Lámina de hierro lisa .....	1650-1900	0.55-0.60
Hierro vaciado, torneado a máquina .....	1620-1810	0.60-0.70
<b>Superficies oxidadas</b>		
Placa de hierro, pickleada, cubierta con óxido rojo .....	68	0.612
Completamente oxidada .....	67	0.685
Lámina de acero rolada .....	70	0.657
Hierro oxidado .....	212	0.736
Hierro vaciado, oxidado a 1100°F .....	390-1110	0.61-0.78
Acero oxidado a 1100°F .....	390-1110	0.79-0.79
Hierro electrolítico, terso, oxidado .....	260-980	0.78-0.82
Oxido de hierro .....	930-2190	0.85-0.89
Lingotes de hierro ásperos .....	1700-2040	0.87-0.95
Lámina de acero, con una capa de óxido resistente y áspero .....	75	0.80
Capa de óxido denso, brillante .....	75	0.82
Placa vaciada, lisa .....	73	0.80
Áspera .....	73	0.82
Hierro vaciado, áspero, fuertemente oxidado	100-480	0.95
Hierro forjado, oxidado opaco .....	70-680	0.94

TABLA 12 EMISIVIDAD NORMAL TOTAL DE VARIAS SUPERFICIES  
(HOTTEL) A. METALES Y SUS OXIDOS  
(Continúa)

Superficie	t, °F *	Emisividad *
Placa de acero, áspera .....	100-700	0.91-0.97
Aleaciones del acero a alta temperatura. (Ver Aleaciones de níquel)		
Metal fundido	—	
Hierro vaciado .....	2370-2550	0.29-0.29
Acero suave .....	2910-3270	0.28-0.28
<b>Latón</b>		
Altamente pulido		
73.2% Cu, 26.7% Zn .....	476-671	0.028-0.031
62.4% Cu, 36.8% Zn, 0.4% Pb, 0.3% Al ..	491-710	0.033-0.037
82.9% Cu, 17.0% Zn .....	530	0.030
Rolado duro, pulido, pero con huellas visibles de pulido .....	70	0.038
pero con algo de ataque .....	73	0.043
pero con trazas de estearina re- manentes del pulido .....	75	0.053
Pulido .....	100-900	0.096-0.096
Placa rolada, superficie natural .....	72	0.06
Frotada con esmeril grueso .....	72	0.20
Placa opaca .....	120-690	0.22
Oxidado por calentamiento a 1110°F .....	390-1110	0.61-0.59
Mercurio .....	32-212	0.09-0.12
Molibdeno, filamento .....	1340-4700	0.096-0.292
Monel, metal, oxidado a 1110°F .....	390-1110	0.41-0.46
<b>Níquel</b>		
Electrodepositado en hierro pulido, luego pu- lido .....	74	0.045
Técnicamente puro, pulido (98.9% Ni + Mn)	440-710	0.07-0.087
Electrodepositado en hierro pickleado, no pu- lido .....	68	0.11
Alambre .....	368-1844	0.096-0.186
Placa, oxidada por calentamiento a 1110°F ...	390-1110	0.37-0.48
Oxido de níquel .....	1200-2290	0.59-0.86
<b>Níquel, aleaciones de</b>		
Cromoníquel .....	125-1894	0.64-0.76
Nickelin (18-32 Ni; 55-68 Cu; 20 Zn), gris oxi- dado .....	70	0.262
Ka-2S aleación de acero (8% Ni; 18% Cr), plateado ligero, aspecto, café, después del calentamiento .....	420-914	0.44-0.36
después de 42 h de calentamiento a 980°F .....	420-980	0.62-0.73
NCT-3 aleación (20 Ni; 25 Cr). Café, man- chado, oxidado por el servicio .....	420-980	0.90-0.97
NCT-6 aleación (60 Ni; 12 Cr). Liso, ne- gro, capa firme de óxido adhesivo por el servicio .....	520-1045	0.89-0.82
<b>Oro</b>		
Puro, altamente pulido .....	440-1160	0.018-0.035
<b>Plata</b>		
Pulida, pura .....	440-1160	0.0198-0.0324
Pulida .....	100-700	0.0221-0.0312

TABLA 12 EMISIVIDAD NORMAL TOTAL DE VARIAS SUPERFICIES  
(HOTTEL) A. METALES Y SUS OXIDOS  
(Continúa)

Superficie	t, °F *	Emisividad *
<b>Platino</b>		
Puro, placa pulida .....	440-1160	0.054-0.104
Tira .....	1700-2960	0.12-0.17
Filamento .....	80-2210	0.036-0.192
Alambre .....	440-2510	0.073-0.182
<b>Plomo</b>		
Puro (99.96%) sin oxidar .....	260-440	0.057-0.075
Gris oxidado .....	75	0.281
Oxidado a 390°F .....	390	0.63
<b>Tántalo, filamento</b> .....		
2420-5430		0.194-0.31
<b>Tungsteno</b>		
Filamento, envejecido .....	80-6000	0.032-0.35
Filamento .....	6000	0.39
<b>Cinc</b>		
Comercial 99.1% pureza, pulido .....	440-620	0.045-0.053
Oxidado por calentamiento a 750°F .....	750	0.11
Lámina de hierro galvanizada, poco brillante ..	82	0.228
Lámina de hierro galvanizada, oxidada gris ...	75	0.276

B. REFRACTARIOS, MATERIALES DE CONSTRUCCION,  
PINTURAS Y VARIOS

Aceite, capas en níquel pulido (aceite lub.) .....	68	
Superficie pulida, sola .....		0.045
+ 0.001 plg de aceite .....		0.27
+ 0.002 plg de aceite .....		0.46
+ 0.005 plg de aceite .....		0.72
capa de aceite de grueso ∞ .....		0.82
<b>Aceite, capas en hojas de aluminio (aceite de li- naza)</b>		
Hoja de Al .....	212	0.087**
+ 1 capa de aceite .....	212	0.561
+ 2 capas de aceite .....	212	0.574
<b>Agua</b> .....		
32-212		0.95-0.963
<b>Asbestos</b>		
Placa .....	74	0.96
Papel .....	100-700	0.93-0.945
<b>Carbón</b>		
Carbón T (Gebruder Siemens) 0.9% cenizas ..	260-1160	0.81-0.79
Este carbón empezó con una emisividad de 0.72 a 260°F, pero en el calentamiento cambió a los valores dados		
Filamento de carbón .....	1900-2560	0.526
Hollin de vela .....	206-520	0.952
Pintura de negro de humo y vidrio soluble ..	209-362	0.959-0.947
Igual al anterior .....	260-440	0.957-0.952
Capa delgada en placa de hierro .....	69	0.927
Capa gruesa .....	68	0.967
Negro de humo, 0.003 plg de grueso o mayor ..	100-700	0.945
Cuarzo, áspero, fundido .....	70	0.932
Fsmalte, fundido blanco, en hierro .....	66	0.897
Estuco, con cal áspera .....	50-190	0.91
<b>Hule</b>		
Duro, placa lustrosa .....	74	0.945
Suave, gris, áspero (recuperado) .....	76	0.859

TABLA 12 EMISIVIDAD NORMAL TOTAL DE VARIAS SUPERFICIES  
(HOTTEL) B. REFRACTARIOS, MATERIALES DE CONSTRUCCION,  
PINTURAS Y VARIOS  
(Continúa)

Superficie	t, °F*	Emisividad*
Ladrillo		
Rojo, áspero, pero sin irregularidades notables.	70	0.93
De sílice, sin vidriar, áspero .....	1832	0.80
De sílice, vidriado áspero .....	2012	0.85
Ladrillo de Grog, vidriado .....	2012	0.75
(Vea Materiales refractarios)		
Mármol, gris claro, pulido .....	72	0.931
Materiales refractarios, 40 diferentes .....	1110-1830	
Malos radiadores .....		[ 0.65 ]
Buenos radiadores .....		[ 0.70 ] -0.75
Buenos radiadores .....		[ 0.80 ] { 0.85
Buenos radiadores .....		[ 0.85 ] { 0.90
Papel, delgado		
Adherido a placa de hierro estañada .....	66	0.924
a placa áspera de hierro .....	66	0.929
a placa con laca negra .....	66	0.944
Papel impermeabilizante para techos .....	69	0.91
Pinturas, lacas, barnices.		
Esmalte blanco, barniz aplicado a placa de		
hierro áspero .....	73	0.906
Laca negra brillante, atomizada en hierro ...	76	0.875
Barniz de laca negro brillante en lámina de		
hierro estañada .....	70	0.821
Barniz de laca negro mate .....	170-295	0.91
Laca negra .....	100-200	0.80-0.95
Laca negra sin lustre .....	100-200	0.96-0.98
Laca blanca .....	100-200	0.80-0.95
Pinturas de aceite, 16 colores diferentes ...	212	0.92-0.96
Pinturas y lacas de aluminio		
10% Al, 22% laca, en superficies ásperas		
o lisas .....	212	0.52
26% Al, 27% laca, en superficies ásperas		
o lisas .....	212	0.3
Otras pinturas de Al, de contenido de Al y		
añejamiento variable .....	212	0.27-0.67
Laca de aluminio y barniz, en placas ásperas	70	0.39
Pintura de aluminio, después de calentar a		
620°F .....	300-600	0.35
Porcelana, vidriada .....	72	0.924
Roble, cepillado .....	70	0.895
Serpentina, pulida .....	74	0.900
Vidrio, liso .....	72	0.937
Yeso, 0.02 plg de grueso en placa lisa u oscurecida.	70	0.903

NOTA. Los resultados de muchos investigadores han sido omitidos debido a los defectos obvios en el método experimental.

\* Cuando dos temperaturas y dos emisividades son dadas, se corresponden primera a primera y segunda a segunda, se pueden hacer interpolaciones lineales.

\*\* Aun cuando este valor es probablemente alto, se da para comparar con los datos del mismo investigador, para mostrar el efecto de las capas de aceite (véase Aluminio, parte A de esta tabla).

TABLA # 13

TABLA 13 LONGITUD MEDIA DE LA TRAYECTORIA RADIANTE EN VARIAS FORMAS DE GAS

Relaciones dimensionales *	Longitud media, L, pies
Hornos rectangulares	
1. 1-1-1 a 1-1-3 1-2-1 a 1-2-4	$\frac{2}{3} \sqrt[3]{\text{volumen del horno, pies}^3}$
2. 1-1-4 a 1-1- $\infty$	1.0 $\times$ la menor dimensión
3. 1-2-5 a 1-2-8	1.3 $\times$ la menor dimensión
4. 1-3-3 a 1- $\infty$ - $\infty$	1.8 $\times$ la menor dimensión
Hornos cilíndricos	
5. $d \times d$	$\frac{2}{3}$ diámetro
6. $d \times 2d$ a $d \times \infty d$	1 $\times$ diámetro
Banco de tubos	
7. Como en las secciones convencionales $L$ (pies) = $0.4P_T - 0.567 DE$ , plg	
* Longitud, ancho y alto en cualquier orden.	

TABLA 14

COEFICIENTES PARA CALCULAR, POR MEDIO DE LA ECUACION 9, EL COEFICIENTE PROMEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN CILINDRO, DENTRO DE UN GAS QUE FLUYE PERPENDICULAR A SU EJE

$Re_{gr}$	$C$	"
0.4-4	0.891	0.330
4-40	0.821	0.385
40-4,000	0.615	0.466
4,000-40,000	0.174	0.618
40,000-400,000	0.0239	0.805

TABLA 15

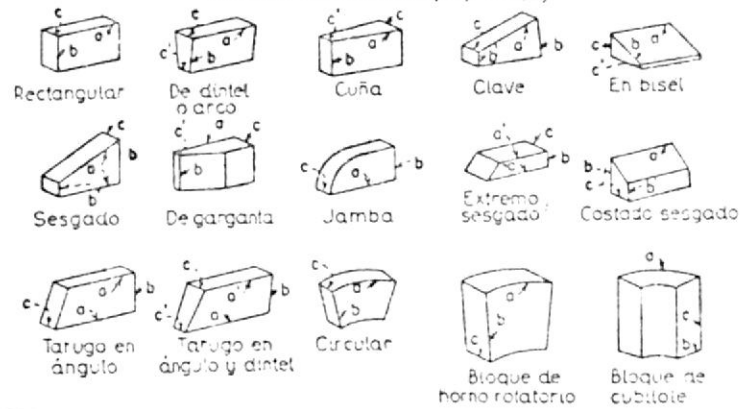
Rango	Angulo de atomización	Longitud	Ancho	Alto	Alto de atomizador	Diámetro de cámara
gph	deg.	(L), in.	(W), in.	(H), in.	(C), in.	in.
0.50-0.65	80	8	8	11	4	9
0.75-0.85	60	10	8	12	4	•
	80	9	9	13	5	10
1.00-1.10	45	14	7	12	4	•
	60	11	9	13	5	•
	80	10	10	14	6	11
1.25-1.35	45	15	8	11	5	•
	60	12	10	14	6	•
	80	11	11	15	7	12
1.50-1.65	45	16	10	12	6	•
	60	13	11	14	7	•
	80	12	12	15	7	13
1.75-2.00	45	18	11	14	6	•
	60	15	12	15	7	•
	80	14	13	16	8	15
2.25-2.50	45	18	12	14	7	•
	60	17	13	15	8	•
	80	15	14	16	8	16
3.00	45	20	13	15	7	•
	60	19	14	17	8	•
	80	18	16	18	9	17

Dimensiones recomendables de cámaras de combustión.

TABLA # 16

Tabla 16 Tamaños y formas de ladrillos refractarios

(Todas las dimensiones en pulg. = mm)



Nombre de los ladrillos	Ladrillos rectangulares, pulg. = mm		
	Longitud a	Ancho b	Epesor c
Rectangular de 9" = 228 mm	9 = 228	4½ = 114	2½ = 63
Pequeño de 9" = 228 mm	9 = 228	3½ = 89	2½ = 63
Angosto	9 = 228	2¾ = 57	2½ = 63
Para jacuelado	9 = 228	2¾ = 70	2½ = 63
Ladrillo partido	9 = 228	4½ = 114	1¼ = 32
Ladrillo grande de 9" = 51 mm	9 = 228	4½ = 114	3 = 51
Grande de 9" = 228 mm	9 = 228	6½ = 171	2½ = 63
Ladrillo rectangular para respaldo plano	9 = 228	6 = 152	2½ = 63
Rectangular 9" x 4½" x 3" = 228 x 114 x 76 mm	9 = 228	4½ = 114	3 = 76
Rectangular 9" x 6" x 3" = 228 x 152 x 76 mm	9 = 228	6 = 152	3 = 76
Rectangular de 13½" = 343 mm	13½ = 343	6 = 152	2½ = 63
Bloque de puente	13½ = 343	3 = 76	3 = 76
Losa de cepo	18 = 457	3 = 76	4½ = 114
Losa de canto vivo	12 = 305	12 = 305	3 = 76
De arena en escuadra N° 101	13 = 340	4½ = 114	3 = 76
De jacuelado para horno Martin Siemens	10½ = 267	4½ = 114	4½ = 114

Tabla 17 Ladrillos adicionales de arco, de cuña y de media citara  
(Dimensiones en pulg. = mm)

Nombre de la forma	a	b	b'	c	c'
Grande, 9" = 228 mm. Cuña N° 1 . . . . .	9 = 228	6 3/4 = 171	.....	2 1/2 = 63	1 7/8 = 47
Grande, 9" = 228 mm. Cuña N° 2 . . . . .	9 = 228	6 3/4 = 171	.....	2 1/2 = 63	1 1/2 = 38
Arco N° 1 de respaldo plano . . . . .	9 = 228	6 = 152	.....	3 1/2 = 89	2 1/2 = 63
Arco N° 2 de respaldo plano . . . . .	9 = 228	6 = 152	.....	3 1/2 = 89	2 = 51
Clave N° 1 de 9 x 6" = 228 x 152 mm	9 = 228	6 = 152	5 5/8 = 146	2 1/2 = 63*	.....
Clave N° 1 de 9 x 6" = 228 x 152 mm	9 = 228	6 = 152	4 3/4 = 122	2 1/2 = 63†	.....
Clave N° 1 de 13 1/2" = 343 mm . . . . .	13 1/2 = 343	6 = 152	5 = 127	2 1/2 = 63†	.....
Clave N° 2 de 13 1/2" = 343 mm . . . . .	13 1/2 = 343	6 = 152	4 3/4 = 111	2 1/2 = 63†	.....
Cuña N° 1 de 13 1/2" = 343 mm . . . . .	13 1/2 = 343	6 = 152	.....	.....	2 3/4 = 70*
Cuña N° 2 de 13 1/2" = 343 mm . . . . .	13 1/2 = 343	6 = 152	.....	.....	2 1/2 = 63†
Cuña N° 3 de 13 1/2" = 343 mm . . . . .	13 1/2 = 343	6 = 152	.....	.....	2 1/2 = 63†
De arista de ángulo N° 102 . . . . .	13 = 330	4 1/2 = 114	.....	.....	2 1/2 = 63†
De arista de arco, N° 104 . . . . .	13 = 330	4 1/2 = 114	.....	.....	2 1/2 = 63†
De arista de arco, N° 104 . . . . .	12 3/4 = 324*	4 1/2 = 114	.....	.....	2 1/2 = 63†
De arista de arco, N° 105 . . . . .	13 = 330	4 1/2 = 114	.....	.....	2 1/2 = 63†

\* a' = 11 3/4 = 289 mm. † = 2 1/2" o 3" = 63 ó 76 mm. ‡ = 3" = 76 mm.

TABLA # 18

Tabla 18 Ladrillos y bloques radiales

(Las dimensiones  $a \times b \times c$  de los ladrillos radiales son  $9'' \times 4\frac{1}{2}'' \times 2\frac{1}{2}'' = 228 \times 114 \times 63$  mm; los bloques para horno rotatorio  $9'' \times 9'' \times 4'' = 228 \times 228 \times 101$  mm; los bloques de  $6'' = 152$  mm para cubilote  $9'' \times 6'' \times 4'' = 228 \times 152 \times 101$  mm; o los bloques de  $6'' = 228$  mm para cubilote  $9'' \times 4\frac{1}{2}'' \times 9'' = 228 \times 114 \times 228$  mm.)

Nombre del ladrillo	Diámetro del círculo, mm		Nº de ladrillos que forman un círculo
	Exterior	Interior	
Ladrillo radial o para círculo de $24'' = 609$ mm	838	609	12
Ladrillo radial de $36'' = 914$ mm	1 143	914	16
Ladrillo radial de $48'' = 1 219$ mm	1 448	1 219	20
Ladrillo radial de $60'' = 1 524$ mm	1 752	1 524	24
Ladrillo radial de $72'' = 1 829$ mm	2 057	1 829	28
Ladrillo radial de $84'' = 2 133$ mm	2 362	2 133	32
Bloque para horno rotatorio de 9-48	1 676	1 219	23
Bloque para horno rotatorio de 9-54	1 829	1 371	25
Bloque para horno rotatorio de 9-60	1 981	1 524	27
Bloque para horno rotatorio de 9-66	2 133	1 676	29
Bloque para horno rotatorio de 9-72	2 286	1 829	31
Bloque para horno rotatorio de 9-78	2 438	1 981	33
Bloque para horno rotatorio de 9-84	2 591	2 133	35
Bloque para horno rotatorio de 9-90	2 743	2 286	38
Bloque para horno rotatorio de 9-96	2 895	2 438	40
Bloque para horno de 9-102 pulg.	3 048	2 591	42
Bloque N° 30 de 6 pulg. para cubilote	1 067	762	15
Bloque N° 36 de 6 pulg. para cubilote	1 219	914	17
Bloque N° 42 de 6 pulg. para cubilote	1 371	1 067	19
Bloque N° 48 de 6 pulg. para cubilote	1 524	1 219	21
Bloque N° 54 de 6 pulg. para cubilote	1 676	1 371	23
Bloque N° 60 de 6 pulg. para cubilote	1 829	1 524	25
Bloque N° 66 de 6 pulg. para cubilote	1 981	1 676	27
Bloque N° 72 de 6 pulg. para cubilote	2 133	1 829	29
Bloque N° 78 de 6 pulg. para cubilote	2 286	1 981	31
Bloque N° 84 de 6 pulg. para cubilote	2 438	2 133	33
Bloque N° 90 de 6 pulg. para cubilote	2 591	2 286	36
Bloque N° 96 de 6 pulg. para cubilote	2 743	2 438	38
Bloque N° 102 de 6 pulg. para cubilote	2 895	2 591	40
Bloque N° 1-8 de 9 pulg. para cubilote	3 048	2 743	42
Bloque N° A de 9 pulg. para cubilote	435	496	9
Bloque N° B de 9 pulg. para cubilote	762	585	11
Bloque N° C de 9 pulg. para cubilote	914	686	13
Bloque N° D de 9 pulg. para cubilote	960	762	14
Bloque N° E de 9 pulg. para cubilote	1 244	1 016	17
Bloque N° F de 9 pulg. para cubilote	1 524	1 219	21
Bloque N° G de 9 pulg. para cubilote	1 752	1 524	24
Bloque N° H de 9 pulg. para cubilote	2 083	1 854	29

TABLA # 19

Tabla Composición química de los refractarios típicos\*

Nº	Tipo de refractario	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	Alcrista	Resistencia			
											Escoria de silicio negro	Escoria de acero con alto contenido de cal	Casca- rilla de laminación de alta temperatura	Escoria de cenizas de carbón
1	Alto en alúmina	22-26	68-72	1-1.5	5.5-2.2	.....	.....	.....	.....	1-1.5*	R	R	R	R
2	Alúmina (fundida)	8-10	85-90	1-1.5	1.3-2.2	.....	.....	.....	.....	0.6-1.3*	R	R	R	R
3	Alúmina refractaria (secado a alto calor)	30-37	36-42	1.5-2.5	.....	.....	.....	.....	.....	1.3*	R	M	R	R
4	Alúmina refractaria (superóxido)	41	41	1	2	.....	.....	.....	.....	2*	M	R	R	R
5	Corono	6	23	15*	.....	.....	17	30	.....	.....	R	F	R	R
6	Corono (sin coque)	5	18	12*	.....	.....	32	30	.....	.....	R	F	R	R
7	Caolín	52	45.4	0.6	1.7	0.1	0.2	.....	.....	.....	M	F	R	R
8	Caolín de silicio (aglutinado con arcilla)	7-9	2-4	0.3-1	1	.....	.....	.....	85-90	.....	R	R	R	F
9	Fosterita	34.6	0.9	7.0	.....	1.3	55.4	.....	.....	.....	M	M	R	M
10	Ladrillo refractario aislante (1425° C.)	52.7	36.8	2.4	1.5	0.6	0.5	.....	.....	.....	R	F	R	F
11	Magnesita	3	2	6	.....	3	86	.....	.....	.....	R	F	R	F
12	Magnesita (sin coque)	5	7.5	8.5	.....	2	64	10	.....	.....	R	F	R	F
13	Magnesita (fundida)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	R	F	R	F
14	Periclina refractaria	25-70	23-60	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	R	F	R	M
15	Silice	96	1	1	.....	2	.....	.....	.....	.....	R	M	R	R
16	Silimanita (molida)	35	62	0.5	1.5	.....	.....	.....	.....	0.5*	R	R	R	R

\* Como parte de estos datos han sido tomados de una tabla preparada por Tronel, Chén, and Mel. Eng., noviembre, 1938.

° Como FeO

° Incluye cal y magnesita.

\* Excelente si se deja a más de 650° C.

° Alúmina oxidante.

F = excelente. B = buena. R = regular. M = mala.

TABLA #120

Tabla Propiedades físicas de los refractarios típicos\*

(Los números de los refractarios se refieren a la tabla 1)

Nº del refractario	Punto de fusión		Deformación bajo carga porcentajes a la temperatura C. y a los Kg/cm <sup>2</sup> indicados	Resistencia al agrietamiento y desconchamiento por cambios de temperatura	Contracción por recalentamiento después de 5 horas. porcentajes a (grados C.)	Peso de ladrillo rectangular de 23 cm (9") Kg
	Grados C.	Cono piro-métrico				
1	1 810	36	1-4 a 1 450 y 1.76	Excelente	-2 a 4 (1 600)	3.4
2	1 865 +	39 +	1 a 1 500 y 3.5	Buena	+0.5 (1 600)	41-4.8
3	1 602 - 1 743	31 - 33	2.5 - 10 a 1 350 y 1.76	Buena	+0 a 1.5 (1 400)	3.4
4	1 743 - 1 760	33 - 34	2-4 a 1 450 y 1.76	Excelente	+0 a 1.5 (1 600)	3.8
5	1 970 +	41 +	Cortantes 1 505 y 1.97	Poca	-0.5 a 1.0 (1 650)	5.0
6	1 970 +	41 +	Cortantes 1 625 y 1.97	Regular	-0.5 a 1.0 (1 650)	5.12
7	1 760	34	0.5 a 1 450 y 1.76	Excelente	-0.7 a 1.0 (1 600)	3.5
8	1 865	39	0-1 a 1 500 y 3.5	Excelente	+2 (1 600)	3.6-4.2
9	1 837	41	10 a 1 620	Regular	.....	4.1
10	1 638 - 1 650	29 - 30	0.3 a 1 205 y 0.7	Buena	-0.2 (1 425)	1.02
11	1 970 +	41 +	Cortantes 1 520 y 1.97	Poca	-1 a 2 (1 650)	4.53
12	1 970 +	41 +	Cortantes 1 615 y 1.97	Regular	-0.5 a 1.5 (1 650)	4.85
13	1 970 +	41 +	.....	Regular	.....	4.76
14	1 490 - 1 650	16 - 30	.....	Buena	.....	.....
15	1 680 - 1 700	31 - 32	Cortantes 1 593 y 1.76	Poca*	+0.5 a 0.8 (1 450)	2.9
16	1 820 - 1 835	37 - 38	0-0.5 a 1 450 y 1.76	Excelente	-0 a 0.8 (1 600)	3.8

Nº de refractario	Porosidad	Calor específico. 15° a 650° C.	Coeficiente de dilatación térmica a partir del punto de contracción a 15° C. x 10 <sup>6</sup>	Conductibilidad térmica media. Cal. por m <sup>2</sup> por hora por grado C. por cm de espesor						
				Temperaturas medias entre las caras caliente y fría, grados C.						
				95	205	425	650	870	1 095	1 315
1	20 - 26	0.23	0.43	74	87	99	112	124	149	161
2	20 - 26	0.23	0.77	..	248	273	288	335	372	397
3	10 - 12	0.23	0.45 - 0.54	62	74	87	99	124	136	149
4	15 - 25	0.23	0.45 - 0.54	74	87	99	112	124	149	161
5	12 - 15	0.23	1.00	..	99	112	124	136	149	149
6	23 - 26	0.21	.....	..	.....	.....	.....	.....	.....	.....
7	28 - 36	0.22	0.41	..	.....	136	148	161	161	174
8	18	0.22	0.43	..	.....	1 240	990	806	682	620
9	20 - 26	0.25	.....	..	.....	.....	.....	.....	.....	.....
10	10 - 12	0.22	0.45	..	19.8	24.8	32.2	39.7	47.1	.....
11	20 - 30	0.27	1.00 - 1.49	..	496	434	372	335	322	310
12	.....	0.26	.....	..	.....	.....	.....	.....	.....	.....
13	20 - 30	0.27	1.00 - 1.44	..	.....	.....	.....	.....	.....	.....
14	13 - 26	0.23	0.54	..	174	186	211	223	236	248
15	20 - 25	0.23	0.83*	..	99	124	149	161	174	186
16	75	0.23	0.54	..	124	136	149	161	174	186

\* Gran parte de estos datos han sido tomados de una tabla preparada por Trostel, *Chem. and Met. Eng.*, noviembre de 1938.

\* Excelente si se desecha para más de 650° C.

\* Atmósfera oxidante.

\* Hasta 1.00 al rojo.

TABLA # 21

Tabla Calor específico de los refractarios

Temperatura, grados C.	Calor específico medio, de 25 a <i>t</i> grados C.			
	Sílice 1	Sílice 2	Arcilla refractaria	Circón
600	0.226	0.228	0.228	0.137
1 000	0.265	0.262	0.265	0.157
1 200	0.282	0.283	0.284	0.167
1 400	0.293	0.293	0.297	0.175

Heyn (*Mitt. kgl. Materialprüfungsamt*, Jahrg. 32, 1914, página 185) da los datos siguientes sobre el calor específico de los ladrillos de magnesia:

Temp., <i>t</i> grados C.	95	205	315	425	540	815	1 095	1 370
Calor específico medio entre 25 y <i>t</i> grados C.	0.219	0.233	0.244	0.252	0.257	0.270	0.282	0.294

TABLA # 25

$T_o_F$	$h_c$	$h_h$	$h_T$	Le (inch)
100	0.70	1.10	1.80	3.53
150	0.80	1.20	2.00	3.18
200	0.90	1.40	2.30	2.76
250	0.95	1.62	2.57	2.47
300	1.04	1.84	2.88	2.21
350	1.10	2.10	3.20	1.99
400	1.17	2.33	3.50	1.82
450	1.20	2.62	3.82	1.66
500	1.25	2.92	4.17	1.55

Coefficiente convectivo total en función de la temperatura de la superficie exterior de la pared, y la distancia virtual  $Le$ . utilizada en el método gráfico de Smit

TABLA 23<sup>(1)</sup> CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE AISLANTES Y ALGUNOS  
MATERIALES DE CONSTRUCCION \* (Continúa)

## Subtítulos

Ladrillo de carburo de silicio, recristalizado .....	129	1 112	10.7
	129	1 472	9.2
	129	1 832	8.0
	129	2 192	7.0
	129	2 552	6.3
Magnesia, pulverizada .....	49.7	117	0.35
Magnesia, carbonato ligero .....	19	70	0.04
Magnesio, óxido, comprimido .....	49.9	68	0.32
Madera, fibra cruzada .....			
Balsa .....	7.8	86	0.025-0.03
Olmo .....	51.5	59	0.12
Maple .....	44.7	122	0.11
Pino, blanco .....	34.0	59	0.087
Teca .....	40.0	59	0.10
Abeto .....	28.1	140	0.062
Madera, paralelo a la fibra .....			
Pino .....	34.4	70	0.20
Mármol .....			1.2-1.7
Mica, perpendicular a los planos .....		122	0.25
Negro de humo .....	10	104	0.038
Nieve .....	34.7	32	0.27
Piedra pómez .....		70-151	0.14
Pizarra .....		201	0.86
Papel .....			0.075
Papel tapiz, tipo aislante .....	14.8	70	0.028
Papel tapiz, cartoncillo .....	43	86	0.04
Parafina .....		32	0.14
Plásticos piroxilina .....			0.075
Porcelana .....		392	0.86
Seda .....	6.3		0.026
Barnizada .....		100	0.096
Vidrio .....			0.2-0.73
Tipo boro-silicato .....	139	86-167	0.63
Vidrio a la soda .....			0.3-0.44
Vidrio de ventana .....			0.3-0.61
Viruta de madera .....	8.8	86	0.034
Yeso, moldeado y seco .....	78	68	0.25

\* De S. Marks, "Mechanical Engineers' Handbook", McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1941.

TABLA 24 (15)

Propiedades termodinámicas del aire a baja presión\*

$T, R$	$\frac{h}{Btu/lb\ m}$	$P, \ddagger$	$\frac{Btu/lb\ m}{u}$	$v, \ddagger$	$\frac{Btu/lb\ m-R}{\phi}$
200	47.67	0.04320	33.96	1714.9	0.36303
220	52.46	0.06026	37.38	1352.5	0.38584
240	57.25	0.08165	40.80	1088.8	0.40666
260	62.03	0.10797	44.21	892.0	0.42582
280	66.82	0.13986	47.63	741.6	0.44356
300	71.61	0.17795	51.04	624.5	0.46007
320	76.40	0.22290	54.46	531.8	0.47550
340	81.18	0.27545	57.87	457.2	0.49002
360	85.97	0.3363	61.29	396.6	0.50369
380	90.75	0.4061	64.70	346.6	0.51663
400	95.53	0.4858	68.11	306.0	0.52890
420	100.32	0.5760	71.52	270.1	0.54058
440	105.11	0.6776	74.93	240.6	0.55172
460	109.90	0.7913	78.36	215.33	0.56235
480	114.69	0.9182	81.77	193.65	0.57255
500	119.48	1.0590	85.20	174.90	0.58233
520	124.27	1.2147	88.62	158.58	0.59173
540	129.06	1.3860	92.04	144.32	0.60078
560	133.86	1.5742	95.47	131.78	0.60950
580	138.66	1.7800	98.90	120.70	0.61793
600	143.47	2.005	102.34	110.88	0.62607
620	148.28	2.249	105.78	102.12	0.63395
640	153.09	2.514	109.21	94.30	0.64150
660	157.92	2.801	112.67	87.27	0.64902
680	162.73	3.111	116.12	80.96	0.65621
700	167.56	3.446	119.58	75.25	0.66321
720	172.39	3.806	123.04	70.07	0.67002
740	177.23	4.193	126.51	65.38	0.67665
760	182.08	4.607	129.99	61.10	0.68312
780	186.94	5.051	133.47	57.20	0.68942
800	191.81	5.526	136.97	53.63	0.69558
820	196.69	6.033	140.47	50.35	0.70160
840	201.56	6.573	143.98	47.34	0.70747
860	206.46	7.149	147.50	44.57	0.71323

(15) Fundamentos de Termodinámica por Van Wylen y Sonntag

TABLA 24 (15)

Propiedades termodinámicas del aire a baja presión\* (continuación)

T, R ••	h, Btu/lb m †	P, †	u, Btu/lb m ‡	v, ‡	φ, Btu/lb m-R §
880	211.35	7.761	151.02	42.01	0.71886
900	216.26	8.411	154.57	39.64	0.72438
920	221.18	9.102	158.12	37.44	0.72979
940	226.11	9.834	161.68	35.41	0.73509
960	231.06	10.610	165.26	33.52	0.74030
980	236.02	11.430	168.83	31.76	0.74540
1000	240.98	12.298	172.43	30.12	0.75042
1020	245.97	13.215	176.04	28.59	0.75536
1040	250.95	14.182	179.66	27.17	0.76019
1060	255.96	15.203	183.29	25.82	0.76496
1080	260.97	16.278	186.93	24.58	0.76964
1100	265.99	17.413	190.58	23.40	0.77426
1120	271.03	18.604	194.25	22.30	0.77880
1140	276.08	19.858	197.94	21.27	0.78326
1160	281.14	21.18	201.63	20.293	0.78767
1180	286.21	22.56	205.33	19.377	0.79201
1200	291.30	24.01	209.05	18.514	0.79628
1220	296.41	25.53	212.78	17.700	0.80050
1240	301.52	27.13	216.53	16.932	0.80466
1260	306.65	28.80	220.28	16.205	0.80876
1280	311.79	30.55	224.05	15.518	0.81280
1300	316.94	32.39	227.83	14.868	0.81680
1320	322.11	34.31	231.63	14.253	0.82075
1340	327.29	36.31	235.43	13.670	0.82464
1360	332.48	38.41	239.25	13.118	0.82848
1380	337.68	40.59	243.08	12.593	0.83229
1400	342.90	42.88	246.93	12.095	0.83604
1420	348.14	45.26	250.79	11.622	0.83975
1440	353.37	47.75	254.66	11.172	0.84341
1460	358.63	50.34	258.54	10.743	0.84704
1480	363.89	53.04	262.44	10.336	0.85062
1500	369.17	55.86	266.34	9.948	0.85416
1520	374.47	58.78	270.26	9.578	0.85767
1540	379.77	61.83	274.20	9.226	0.86113
1560	385.08	65.00	278.13	8.890	0.86456
1580	390.40	68.30	282.09	8.569	0.86794
1600	395.74	71.73	286.06	8.263	0.87130
1620	401.09	75.29	290.04	7.971	0.87462

TABLA # 22

X Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1032	1116	1127	1093	1066	1043	1032	1004	982	974
2	1060	1149	1127	1088	1060	1049	1032	1010	988	977
3	966	1088	1121	1082	1066	1060	1038	1013	993	988
4	460	960	1071	1082	1071	1066	1043	1021	999	991
5	410	982	1088	1099	1088	1071	1049	1024	1002	993
6	743	1143	1149	1121	1093	1071	1043	1027	999	993
7	1060	1138	1154	1127	1093	1071	1043	1021	993	982
8	1066	1121	1143	1121	1082	1066	1038	1004	988	979
9	1066	1104	1121	1104	1071	1054	1032	999	982	977

Distribución de la TEMPERATURA en el plano central horizontal  
(temperatura en °C )

TABLA # 23

Y Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	999	1132	1104	1077	1066	1038	1021	999	999	787
2	999	1154	1132	1093	1082	1054	1038	1032	1016	816
3	999	1154	1132	1099	1091	1068	1046	1038	1021	904
4	966	1093	1121	1099	1093	1077	1052	1043	1027	916
5	838	1010	1088	1099	1099	1088	1054	1049	1032	893
6	1093	1110	1127	1102	1099	1088	1054	1052	1032	782
7	1154	1210	1166	1121	1104	1088	1057	1052	1032	749
8	1066	1238	1171	1127	1104	1088	1060	1054	1032	704
9	1043	1210	1154	1127	1104	1088	1060	1054	1032	827

Distribución de la TEMPERATURA en el plano central vertical  
( temperatura en °C )