

3  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**“BASES TEORICAS PARA EL DISEÑO DE UN  
HORNO DE CEMENTADO, CON CALENTAMIENTO  
A BASE DE TUBOS RADIANTES”**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**  
**P R E S E N T A :**  
**VICENTE CASTRO GARCIA**

**MEXICO, D. F.**

**1987**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# C O N T E N I D O

	Pág.
I.- INTRODUCCION	1
1.1    GENERALIDADES	2
1.2.    CARBURIZADO	6
1.2.1 AGENTES GASEOSOS	7
1.2.2 CARBONITRURACION	14
II.- DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE UN HORNO	16
III.- PARAMETROS Y CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL HORNO	21
III.1    PROCESO DE CEMENTADO	21
III.2.    CALCULO TERMICO	26
III.2.1 ZONA DE CALENTAMIENTO	27
III.2.2 PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES	30
III.2.3 CALOR TRANSFERIDO POR LOS GASES DE COMBUSTION HACIA LOS TUBOS RADIANTES	38
IV.- ANALISIS DE RESULTADOS	62
V.- CONCLUSIONES	64
VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	64
VII.- TABLAS Y GRAFICAS	69

# C A P I T U L O I

## INTRODUCCION

En la Actualidad hay la necesidad de utilizar piezas tratadas termoquímicamente, principalmente en la industria - metalmeccánica y automotriz; aunque, las dimensiones, la forma y el peso de las piezas varían dependiendo de las necesidades que tenga una industria en particular. Estas razones hacen necesario diseñar un horno que se apegue estrictamente a los requerimientos de cada compañía.

En este trabajo se da solución a un problema planteado por una empresa que requiere un horno de cementado.

Los datos que se utilizarán son reales y fueron proporcionados por la compañía TRANSEJES, S.A. Esta compañía requiere cementar piezas automotrices.

Para efectuar el diseño del horno, se requiere desarrollar los siguientes puntos:

- 1).- Determinar la concentración de los gases que componen la atmósfera carburante, con la que se obtendrá la concentración de carbono requerida sobre la superficie de las piezas para dar la dureza pedida por el cliente.

2).- Calcular la cantidad de calor requerido por las piezas a tratar, por los contenedores, y las pérdidas de calor durante el proceso. En este punto se analizará la manera en la cual se transfiere calor partiendo desde la combustión del combustible hasta la utilización del mismo en el horno.

3).- Con las dimensiones de las piezas, se determinan las dimensiones internas del horno para que dentro de él quepan las piezas a tratar y se efectúe el tratamiento satisfactoriamente.

4).- Selección del equipo de combustión necesario para cubrir la demanda de calor requerida por el horno.

### I.1 GENERALIDADES.

Entre los materiales que el hombre ha utilizado a través de su historia, los metales han jugado un papel importante en su desarrollo. Uno de los metales de mayor uso es el hierro, metal que en su forma pura no tiene muchos usos - debido a sus propiedades mecánicas pobres y su alta tendencia a oxidarse; sin embargo, cuando se le adicionan algunos elementos para formar aleaciones, sus propiedades mejoran notablemente.

La aleación más importante del hierro es el acero, el cual es una aleación hierro - carbono, con contenidos de éste último hasta 2.0 %. A esta gama de aleaciones se les conoce como aceros al carbono, los cuales además contienen pequeñas cantidades de manganeso y silicio así como impurezas (azufre, fósforo, cobre, hidrógeno, nitrógeno, etc.). Los aceros al carbono tienen una infinidad de usos entre los que se pueden mencionar: la fabricación de materiales estructurales, aceros planos, rieles, barras, alambres, tuberías, etc.

Es posible también añadirle al acero pequeñas cantidades de metales tales como: níquel, cromo, molibdeno o vanadio con los cuales se producen aceros para un uso más específico; por ejemplo, los aceros grado herramienta utilizados en buriles, cuchillas, dados, punzones, etc. Por otra parte si los elementos mencionados anteriormente se adicionan al acero en cantidades apropiadas, es posible obtener aceros inoxidables, termoresistentes o inclusive super-aleaciones base cromo-níquel, las cuales son resistentes tanto a la corrosión acuosa, como a la corrosión a alta temperatura.

Como se ha mencionado, el uso del hierro y alguna de sus aleaciones en la vida del hombre actual es tan generalizada que sería prácticamente imposible sustituirlos -- por otro metal o aleación.

Es cierto que el aluminio y sus aleaciones han tenido un gran auge en la actualidad debido a sus propiedades mecánicas y buena tenacidad cuando son tratadas térmicamente, además de ser resistentes a la corrosión cuando son anodizadas, pero su uso no es tan extenso en donde se requiere alta resistencia mecánica. En contraparte, el aluminio es un metal más caro que el acero.

Podemos resumir diciendo que actualmente la producción y consumo de acero, sobre todo los de alta calidad en todos los países marca un índice de su nivel de desarrollo.

Para que algún tipo de acero pueda utilizarse en una aplicación específica es necesario conocer sus propiedades para que en condiciones de servicio se obtenga el mayor rendimiento posible.

En muchas aplicaciones industriales se requiere tener piezas con una superficie dura, que resista el desgaste, conservando su parte interna o núcleo suave y tenaz para amortiguar los esfuerzos. Estas piezas forman las partes rotativas de una infinidad de mecanismos.

Algunos ejemplos de piezas que son ampliamente utilizadas y que requieren estas propiedades son: coronas - -

dentadas, sinfines, bolas y cilindros para la fabricación de baleros y chumaceras; en general piezas que estén sujetas a una fuerte abrasión superficial y a la vez alto impacto.

Con los tratamientos térmicos convencionales para el endurecimiento de los aceros (temple y revenido) no es posible obtener las propiedades requeridas para el servicio de las piezas arriba mencionadas, lo cual hace necesario darles otro tipo de tratamiento.

Los tratamientos para el endurecimiento superficial de piezas de acero son los siguientes: endurecimiento con flama, endurecimiento por inducción, carburizado, nitrurado y carbonitrurado. Los dos primeros tipos de endurecimiento pueden considerarse como una variante del temple normal ya que las piezas a tratar son calentadas superficialmente hasta su temperatura de austenización para después ser enfriadas bruscamente. Las estructuras que se obtienen al final del tratamiento son: una capa superficial de martensita y una estructura interna, la cual es una mezcla de ferrita y perlita. Pero es necesario señalar que los procedimientos más utilizados a nivel industrial son: el carburizado, el nitrurado, y el carbonitrurado. A estos tratamientos se les conoce como termoquímicos debido a que la composición química de la superficie



varía durante el proceso.

## 1.2. CARBURIZADO.

Este tratamiento es utilizado para el endurecimiento superficial de piezas de acero mediante el incremento del contenido de carbono en su superficie, este proceso se efectúa llevando las piezas que se desean tratar hasta la temperatura de austenización en un ambiente carburante. Este ambiente carburante cede carbono sobre la superficie de las piezas, el cual se absorbe y difunde hacia el interior de las mismas. Después de incrementar el contenido de carbono en la superficie de las piezas éstas se templen provocando un endurecimiento mayor en su superficie que en su núcleo.

La máxima solubilidad de carbono en hierro se logra en la fase austenítica y abarca el intervalo de 0.8 hasta 2.0 %. Aunque el límite superior es 2.0 %, no se recomienda tener composiciones en capas cementadas mayores al 1.1 %, Generalmente los rangos que se utilizan van de 0.6 al 1.1 %.

Las temperaturas usuales para efectuar el proceso quedan comprendidas en el intervalo de 850 a 950 °C, aunque en algunos casos se utilizan temperaturas mayores con-

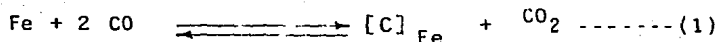
el fin de reducir tiempos de tratamiento.

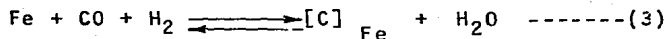
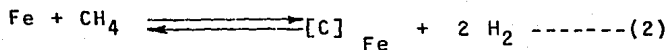
El proceso de carburizado puede efectuarse mediante el uso de atmósferas gaseosas (gas carburante), baño de sales (carburantes líquidos) o compuestos sólidos (cajas de carburizado). La carburización con agentes gaseosos es la más usada a nivel industrial en México ya que tiene un control adecuado y se requiere un mínimo de manejos especiales.

#### 1.2.1. AGENTES GASEOSOS.

Las atmósferas utilizadas en el proceso de carburizado son producidas en generadores mediante la combustión de gas natural u otros hidrocarburos, los gases que componen estas atmósferas son los siguientes: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (vapor), N<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

Algunos de estos gases pueden actuar como agentes carburizantes y otros como agentes descarburizantes. Las principales reacciones involucradas en la transferencia -- del carbono hacia el acero son las siguientes. [2]





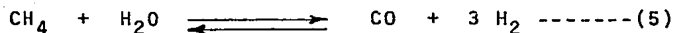
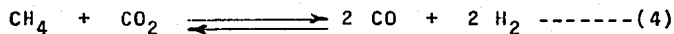
En estas reacciones:  $[\text{C}]_{\text{Fe}}$  representa al carbono - en solución con hierro en la fase austenítica.

Según estudios realizados por Collin, Gunnarson y Thulin [2] las reacciones (1) y (2) solo dan una pequeña - contribución en la realización del proceso de carburizado - mientras que, para la reacción (3) el coeficiente de reac- ción es significativamente alto lo cual implica que el me- canismo de la carburización es controlado por esta reac- ción.

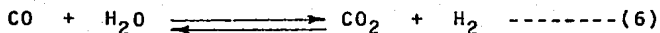
La reacción (1) produce  $\text{CO}_2$  y la reacción (3) pro- duce  $\text{H}_2\text{O}$ , ambas moléculas son severos agentes descarburizantes y la carburización no se podrá realizar si estos a- gentes no se remueven rápidamente. Las cantidades de  $\text{CO}_2$ - y  $\text{H}_2\text{O}$  que pueden ser tolerados sin causar descarburización pueden ser calculados a partir de los datos equilibrio.

Para contrarrestar el efecto descarburante del  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  es conveniente adicionar un hidrocarburo; por ejem- plo metano, que reacciona sobre la superficie del acero, -- con el dióxido de carbono y el vapor de agua de acuerdo a-

[1,2]:



Estas reacciones producen CO, el cual participa -- en la reacción de carburización; de aquí que el metano es la última fuente de carbono para la carburización, el monóxido de carbono es el agente para su transferencia al metal y las reacciones de monóxido de carbono a dióxido de carbono y de hidrógeno a agua controlan el potencial de -- carburización. Estas reacciones además son también afectadas por la reacción siguiente [2].



La carburización gaseosa es principalmente gobernada por el balance químico de las reacciones anteriores, -- las cuales determinan el potencial de carbono en la atmósfera. Este potencial de carbono determina la concentración de carbono en la superficie de la pieza de trabajo, -- siempre y cuando esta concentración no exceda el límite de solubilidad en la austenita a la temperatura de carburización.

Los porcentajes de los gases que componen la atmósfera carburante requeridos para mantener el equilibrio con la concentración de carbono en la superficie del acero a una temperatura dada se determinan a partir de los porcentajes de actividad de éstos en el equilibrio. Así por ejemplo, para las reacciones (1) y (2) las constantes de equilibrio son dadas por Harris [2,3] de la siguiente manera:

$$\text{Para la reacción (1) } \log K = \frac{-8870}{T} + 9.060 \text{ -----(7)}$$

$$\text{Para la reacción (2) } \log K = \frac{4650}{T} - 5.770 \text{ -----(8)}$$

donde "T" está dada en grados Kelvin y "K" es la constante de equilibrio.

ahora bien, para definir la dependencia existente, entre la relación  $H_2O/H_2$  y la reacción  $CO_2/CO$  de la atmósfera del horno y haciendo referencia a la reacción (6), observamos que de la misma forma que las reacciones (1) y (2) la (6) también es reversible y la proporción relativa de cada gas existente en el equilibrio es una función de la temperatura como se muestra en las siguientes ecuaciones [2].

$$\log K = \frac{-1764}{T} + 1.627 \text{ -----(9)}$$

$$K = \frac{CO}{CO_2} \frac{H_2O}{H_2} \quad \text{o bien}$$

$$\frac{H_2O}{H_2} = K \frac{CO_2}{CO}$$

La constante de equilibrio para la reacción gas-a-gua dada anteriormente, ecuación (9), fue calculada por F. E. Harris [3]. Basándose en la reacción (6) se observa que no ocurren cambios de volumen durante la reacción, por lo cual la concentración en el equilibrio no depende de la presión a la cual ocurre la reacción y es evidente entonces que a una temperatura en particular la relación  $H_2O/H_2$  difiere de la relación  $CO_2/CO$  solo por una constante "K" - la cual se expresa en la ecuación (9). Los valores para esta constante a diferentes temperaturas son los que a continuación se tabulan [6].

T (°C)	825	850	875	900	925	950	1000	1025
K	1.03	1.06	1.15	1.23	1.34	1.44	1.64	1.75

El potencial de carbono para atmósferas carburantes puede ser determinado sobre la base de la composición del gas, por la medición del  $CO_2$  o por el contenido de agua en el gas.

El  $\text{CO}_2$  es el componente más comunmente medido para lo cual se utiliza un analizador infrarrojo. El contenido de agua en la atmósfera puede ser determinado por el método del punto de rocío y aún, el potencial de carbono puede ser determinado directamente por un analizador de alambre caliente [1,2].

El gradiente de carbono en los aceros es influenciado únicamente por el rango de concentraciones desde la superficie hacia el centro. A una temperatura dada, la relación de difusión aumenta conforme se incrementa la concentración de carbono.

Para la carburización de aceros comunes, la concentración de la capa carburada debe estar en el rango de 0.6 a 1.1 % con concentraciones en el centro de 0.12 a 0.25 %. Con estos rangos de concentración en la superficie y en el centro, el gradiente puede ser representado en forma aproximada como una línea recta. Esta aproximación, la cual es conocida como el gradiente estandar es establecida tomando la diferencia entre las concentraciones de carbono en la superficie y en el centro y dividido por la profundidad total [2,3].

En general la dureza de un acero está íntimamente relacionado con su contenido de carbono, a mayor contenido

de carbono, mayor dureza. Esto es válido únicamente para aceros al carbono, no siendo así para aceros que tienen algunos elementos de aleación (cuando la cantidad de elementos aleantes es mayor al 5%).

Los datos de equilibrio usados en la predicción de la composición de la atmósfera carburante para un contenido de carbono en el acero, son afectados por el contenido de elementos aleantes en él. Por ejemplo el potencial de carbono efectivo en la atmósfera debe ser incrementado por la presencia de elementos tales como: Mn, Cr y Mo. Los --cuales forman carburos más estables que el carburo de hierro, o es disminuido por elementos tales como Si y Ni, los cuales forman carburos menos estables. El efecto de los --elementos aleantes sobre el potencial de carbono puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación [2].

$$\begin{aligned}
 \log (f) = & 0.005(\% \text{ Si}) - 0.013(\% \text{ Mn}) \\
 & - 0.04 (\% \text{ Cr}) + 0.014(\% \text{ Ni}) \\
 & - 0.013(\% \text{ Mo}) \text{ -----(10)}
 \end{aligned}$$

donde f es un factor de corrección que da la desviación en la composición de la atmósfera carburante cuando hay elementos aleantes en el acero.



### I.2.2. CARBONITRURACION

La carbonitruración se puede considerar como una modificación del proceso de carburización gaseosa. Esta modificación consiste en la introducción de amoníaco en las atmósferas que se utilizan para la carburización. Con esto se logra la introducción de nitrógeno sobre la superficie de las piezas, mientras la carburización se está efectuando. El amoníaco en la atmósfera se disocia para formar nitrógeno atómico, el cual es absorbido por las piezas.

Generalmente el carbonitrurado se efectúa a temperaturas más bajas y tiempos más cortos que los utilizados para el carburizado. Las capas carbonitruradas tienen espesores pequeños que varían de 0.075 a 0.75 mm. La composición y por lo tanto las propiedades finales de las piezas carbonitruradas dependen tanto de la temperatura como de la composición de la atmósfera y del tipo de acero con el que estén hechas las piezas.

Una de las mayores ventajas de la carbonitruración es que el nitrógeno absorbido durante el proceso disminuye la relación crítica de enfriamiento del acero, (recorre las curvas T.T.T. hacia la derecha), además se logra un aumento significativo de la dureza superficial. Esto per-

mite el uso de aceros que ordinariamente no eran utilizados para este fin (endurecimiento superficial).

Cuando las propiedades del núcleo de las piezas no son importantes, la carbonitruración permite el uso de aceros de bajo carbono, los cuales tienen menor costo y mayor índice de maquinabilidad.

Debido a los efectos de endurecimiento que provoca el nitrógeno, es posible templear en aceite aceros tales como: AISI 1010, AISI 1020 y AISI 1113. Otros beneficios que se obtienen con el carbonitrurado son el mejor control en las dimensiones finales de las piezas, así como un mínimo de distorsión.

Las atmósferas usadas en la carbonitruración están compuestas generalmente de mezclas de gas Carrier (mezcla de nitrógeno, hidrógeno y monóxido de carbono), gas enriquecido (algún hidrocarburo como metano, propano o butano) y amoníaco. Básicamente las atmósferas se producen mediante la adición del 2 al 12 % de amoníaco a la atmósfera del gas estandar usada para la carburización [1,2].

## C A P I T U L O   I I

### DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE UN HORNO.

El diseñador y constructor de hornos industriales necesita de una serie de datos, los cuales le deberá proporcionar su cliente para que en base a estos, realicen su trabajo. Los parámetros más importantes que el diseñador debe tomar en cuenta son:

1.- TIPO DE TRATAMIENTO: El tratamiento que deberá realizar el horno puede abarcar desde el calentamiento en una sola etapa, hasta un ciclo complejo de calentamiento, para lo cual el cliente deberá proporcionar el tiempo que requiere su producto y la temperatura para el tratamiento o bien los datos necesarios para poder calcular estas variables.

2.- TIPO DE CARGA: Este dato es muy importante ya que con el se deberá seleccionar el contenedor que deberá soportar la carga durante el tratamiento, de la misma manera se podrá seleccionar el material adecuado para este fin. Los contenedores pueden ser: charolas de diversas formas y tamaños, o bien estantes (estructuras sobre las cuales se colocan las charolas o bien directamente las piezas a tratar). Ambos, tanto las charolas como los estantes deben

ser construidas con los materiales que el proceso requiera para dar una buena eficiencia en la transferencia de calor y alta durabilidad. En algunos hornos estos accesorios no son requeridos, cuando las cargas son muy voluminosas y pesadas; para estos casos las cargas pueden ir colocadas sobre el piso del mismo.

3.- PRODUCCION REQUERIDA: Este dato es el que determina el tamaño del horno, para ello el cliente deberá indicar el número de turnos que trabajarán sus equipos, así como las condiciones en las que entregará la carga y las condiciones al final del proceso.

4.- MEDIO DE CALENTAMIENTO: El cliente deberá indicar el tipo de combustible que suministrará para su horno, de esta manera se selecciona el sistema de combustión adecuado para el proceso. Los combustibles más usados en México [7] son: gas natural, gas L.P., diesel y combustóleo número 6 (chapopote).

Por otra parte, es posible que en la zona donde se piense instalar el horno no se cuente con una red que suministre combustible o bien que el costo del transporte sea elevado y se tenga la necesidad que el medio de calefacción sea eléctrico. En este caso el cliente deberá indicar la -

potencia con la que cuenta su planta, así como el voltaje que se maneja en la misma.

El diseñador, por su parte deberá calcular la cantidad de calor que requiere el proceso para indicarle a su cliente el consumo mínimo necesario de combustible para cubrir las necesidades del horno o bien indicarle si su potencial eléctrico es suficiente o no.

#### 5.- LUGAR EN DONDE SE PRETENDE INSTALAR EL HORNO:

Debido a que los quemadores y demás equipos de combustión están calibrados para operar a 760 mm de mercurio cualquier otra altura provocará un nuevo ajuste de los mismos.

Si el sistema de calefacción es eléctrico, la consideración anterior no se toma en cuenta.

6.- EQUIPOS ADICIONALES: El cliente deberá indicar el grado de automatización que desee en su horno, ya que las operaciones de carga y descarga al horno se pueden realizar en forma manual o en forma automática, entre los equipos que se pueden ofrecer se encuentran: las mesas de carga, sistemas automáticos para el transporte de la carga dentro del horno y sistemas automáticos para el levantamiento de las puertas.

Para éste trabajo, los datos que proporcionó el cliente son los siguientes:

1.- TIPO DE TRATAMIENTO: Endurecimiento superficial de piezas automotrices, por cementado.

2.- TIPO DE CARGA: Engranés para las velocidades -- primera, segunda, tercera, cuarta y el eje engrane de reversa, así como la corona y el árbol primario, el conjunto total pesa 11.3 kg. El tipo de acero que se utilizará para la construcción de estos engranes será un acero AISI 8620, dentro del horno se colocarán en charolas construidas en acero inoxidable tipo AISI 330.

3.- PRODUCCION REQUERIDA: 226 kg/h.

4.- MEDIO DE CALENTAMIENTO: Gas natural.

4.1) tiempo de calentamiento: 2.0 horas

4.2) tiempo de cementado: 4.0 horas

4.3) tiempo de difusión: 0.75 horas (tiempo requerido para que el carbono absorbido difunda hacia el interior de las piezas).

4.4) profundidad de la capa cementada: 0.6 a 0.8 mm

5.- FLUJO DE GAS CARBURANTE:  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $2,118.9 \text{ pie}^3/\text{h}$ )

**6.- LUGAR DONDE SE PRETENDE INSTALAR EL HORNO:**

**México, D.F.**

## C A P I T U L O III

### PARAMETROS Y CALCULOS PARA EL DISERO DEL HORNO

#### III.1 PROCESO DE CEMENTADO.

El dato de la dureza requerida en la superficie de las piezas es muy importante. Para aceros de baja aleación (menos del 5 % de elementos de aleación total) la dureza de la martensita puede considerarse que depende únicamente de la concentración de carbono. Por esta razón y debido a que el contenido total de elementos aleantes para el acero AISI 8620 es 2.55 % debemos calcular el perfil de -- concentraciones de carbón en la capa cementada para poder predecir el perfil de durezas en la misma después que se efectúe el temple.

El perfil de concentraciones dentro del sólido como función del tiempo está dado por la solución de la siguiente ecuación. [8.4]

$$\frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \text{ -----(11)}$$

que corresponde a la expresión de la segunda ley de Fick y cuya solución bajo las siguientes condiciones:



1) Concentración inicial en el sólido constante =  $C_0$ .

2) La concentración superficial se altera súbitamente a  $C_s$  y se mantiene constante.

3) Se considera un sólido semiinfinito con área de flujo másico constante.

4) Coeficiente de difusión constante.

está dada por:

$$\frac{C_c - C_s}{C_0 - C_s} = \text{Erf} \left( \frac{x}{2 \sqrt{D t}} \right) \text{-----} (12)$$

(útil solo para un sistema de flujo binario).

Donde:

$C_c$  = Concentración de carbono como función de la posición y del tiempo.

$C_s$  = Concentración de carbono en la superficie la cual es mantenida por el potencial de carbono en la atmósfera.

$C_0$  : Concentración inicial de carbono, antes de la carburización.

La dependencia del coeficiente de difusión con respecto a la temperatura es calculadora por la siguiente ecuación [3].

$$D = 0.12 \exp \frac{-32000}{RT} \left( \text{en } \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right) \text{ -----(13)}$$

"T" se expresa en grados Kelvin; por lo cual, tenemos a 1198 °K.

$$D = 0.12 \exp \frac{-32000 \text{ cal cm}^2 / \text{mol seg}}{2 \text{ cal/mol } ^\circ\text{K} (1198 ^\circ\text{K})}$$

$$D = 2.0 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Utilizando la solución a la segunda ley de Fick y tomando intervalos de distancia de 0.15 mm. desde la superficie obtenemos la tabla (1). Con los datos de esta tabla podemos hacer gráficas como las mostradas en las figuras (2) y (3). La curva mostrada en la figura (2) indica el porcentaje de carbono que existe a diferentes profundidades desde la superficie para un acero AISI 8620, el cual ha sido carburizado a una temperatura de 925 °C y en el que se ha mantenido un potencial de carbono de 0.8 % en la superficie. Por otra parte la figura (3) muestra la dureza de las piezas bajo las mismas condiciones que las indicadas en la figura (2).

Debido a que la dureza superficial solicitada por el cliente es de 68 Rockwell-C, esta dureza corresponde según la gráfica de la figura (2) y a la tabla de equivalen-

cias (1) a un contenido de carbono de 0.8 %.

La temperatura recomendada por el cliente es de -- 925 °C por lo que haciendo referencia al diagrama fierro-- carbono la composición máxima de carbono en la fase austenítica es 1.62 %, por lo que la actividad o grado de saturación (A) definida como la composición de carbono deseada dividida por la composición máxima a una temperatura dada, será igual a:

$$A = \frac{0.8}{1.62} = 0.4938$$

Considerando que la presión total de la atmósfera-- carburante es de una atmósfera y que la presión parcial del sistema CO-CO<sub>2</sub> sea 0.2 atmósferas, esto es correcto para at mósferas que emplean gas endotérmico [1,2], tenemos:

$$\frac{\% \text{ CO} + \% \text{ CO}_2}{100} = 0.2$$

Sea la fracción en volumen de CO en el sistema CO-- CO<sub>2</sub> = X y la fracción en volumen de CO<sub>2</sub> = 1-X, de acuerdo-- a la ecuación (7) tenemos para una temperatura de 925 °C -- (1198 °K.) en la reacción (7).

$$\log K = \frac{-8870}{1198} + 9.060 = 1.656$$

$$K = 45.29 \quad (\text{adimensional})$$

$$K = 45.29 = \frac{1}{A} \frac{(P_{CO})^2}{(P_{CO_2})}$$

$$45.29 = \frac{0.2}{0.4938} \frac{x^2}{1-x}$$

$$111.82 = \frac{x^2}{1-x}$$

de la relación anterior obtenemos una ecuación de segundo grado con una incógnita.

$$x^2 + 111.82 x - 111.82 = 0$$

resolviendo esta ecuación, encontramos:

$$x_1 = 0.9912$$

$$x_2 = -112.811$$

debido a que la segunda raíz tiene signo negativo, no tiene sentido encontrar las fracciones en volumen tanto del  $CO$  como del  $CO_2$ . Considerando únicamente la primera raíz, tenemos:

$$x = 0.9912$$

$$1-x = 0.0088$$

de donde:

$$\% \text{ real de CO} = 0.9912 (0.20) 100 = 19.824$$

$$\% \text{ real de CO}_2 = 0.0088 (0.20) 100 = 0.176$$

Con estos datos podemos localizar el punto "A" en la gráfica de la figura (4), la cual nos da los porcentajes de equilibrio de monóxido de carbono y dióxido de carbono correspondientes a varias concentraciones de carbono, estas curvas son aplicables para aceros al carbono y aceros de baja aleación a 925 °C [2,3].

Hasta aquí hemos encontrado que para una dureza superficial de 68 Rockwell "C", requerimos una concentración en la superficie de las piezas tratadas de 0.8 % de carbono, y ésta concentración como hemos visto, la podemos conseguir a 925 °C bajo una atmósfera que contenga: 19.824 % de CO y 0.176 % de CO<sub>2</sub>.

### III.2 CALCULO TERMICO.

Los datos que se utilizan para calcular la cantidad de calor que requiere el horno, son los siguientes:

1.- Producción: los kilogramos por hora que deberá producir el horno. Con este dato se calcula la cantidad de calor absorbido por las piezas durante el tratamiento.

2.- Peso y material de los contenedores: como ya se ha mencionado los contenedores pueden ser estantes o charolas. Debido a que estos contenedores también se calientan a la temperatura de la carga, absorben calor. En el presente estudio se utilizarán charolas construídas en fundición de acero inoxidable 330.

3.- Dimensiones de las charolas: con este dato se calculan las dimensiones internas del horno, para después con el espesor de las paredes, determinar las dimensiones exteriores del mismo y de aquí se evalúan las pérdidas de calor a través de las paredes.

En el presente trabajo los datos proporcionados por el cliente fueron:

Producción requerida: 226 Kg/h. (de engranes)

Peso de las charolas: 40 Kg. c/u.

Dimensiones de las charolas: 760 mm. x 380 mm.

Carga máxima por charola: 113 Kg.

De la última condición deducimos que se deberán tratar un total de 2 charolas/h.

### III.2.1 ZONA DE CALENTAMIENTO.

Para calcular la cantidad de calor que requieren tanto los engranes como las charolas se pueden utilizar las ca-

pacidades caloríficas, aunque un método más sencillo es el uso de gráficas en las cuales se puede ver la cantidad de calor absorbido por un material en función de la temperatura a la que se encuentre. La figura (5) [12,13,15,16] muestra las curvas para un acero de bajo carbono con pequeñas cantidades de elementos aleantes, así como las curvas para otros metales. Con fines de ilustración se hará el cálculo utilizando tanto la gráfica de la figura (5) como la capacidad calorífica.

El calor absorbido por los engranes a la temperatura de 925 °C y dos horas de permanencia en la zona de calentamiento, se calcula de la siguiente manera:

De la gráfica para el hierro y acero en la figura (5) y para una temperatura de 1697 °F, la cantidad de calor absorbido para un acero de bajo carbono es: H = 285 -- BTU/Lb, por lo cual:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{engranes}} &= m \times H = 226 \frac{\text{Kg}}{\text{h.}} \times 2.2 \frac{\text{Lb}}{\text{Kg}} \times 285 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}} \\
 &= 141,702 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}}
 \end{aligned}$$

Por otra parte, el calor absorbido por las charolas desde la temperatura ambiente hasta 925 °C será, debido a que las charolas serán construidas con acero inoxidable -

330 y la capacidad calorífica de este material desde temperatura ambiente hasta 1000 °C es 0.12 BTU/Lb °F, con estos datos tenemos:

$$Q_{\text{charolas}} = m C_p (T_2 - T_1) = Q_{\text{ch}}$$

$$Q_{\text{ch}} = 40 \frac{\text{Kg}}{\text{ch}} \times 2 \frac{\text{ch}}{\text{h}} \times 2.205 \frac{\text{Lb}}{\text{Kg}} \times 0.12 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}^\circ\text{F}} \times (925 - 20) 1.8^\circ\text{F} = 34,482.67 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Además el gas carburante debido a que será suministrado a T.P.N se calentará hasta la temperatura de operación, por lo que el calor requerido para efectuar este paso será:

$$Q_{\text{g.c.}} = m C_p (T_2 - T_a)$$

donde:  $Q_{\text{g.c.}}$  = Calor del gas carburante.

$m$  = masa del gas carburante.

$C_p$  = Capacidad calorífica media del gas carburante.

$T_2$  = Temperatura de operación.

$T_a$  = Temperatura ambiente.

La densidad media del gas carburante es : 0.048 -- Lb/pie<sup>3</sup> por lo que el flujo másico será:



$$2118.9 \frac{\text{pie}^3}{\text{h}} \times 0.048 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3} = 101.70 \frac{\text{Lb}}{\text{h}}$$

La capacidad calorífica media del gas carburante desde 25°C hasta 925°C es:  $C_p = 0.445 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}^\circ\text{F}}$ , por lo que  $Q_{g.c}$  hasta 925°C es

$$\begin{aligned} Q_{g.c.} &= 101.70 \frac{\text{Lb}}{\text{h}} \times 0.445 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}^\circ\text{F}} \times (925-25) 1.8^\circ\text{F} \\ &= 73,315.53 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \end{aligned}$$

### III.2.2. PERDIDAS DE CALOR A TRAVES DE LAS PAREDES

Debido a que el calentamiento se realizará únicamente por el mecanismo de radiación y ninguna flama hará contacto con el refractario del horno en su cara interna, ya que los gases de combustión circulan únicamente por el interior de los tubos radiantes, podemos utilizar ladrillos refractarios-aislantes para una temperatura máxima de operación de 1260°C- cuya especificación según normas N.O.M. (ver lista de abreviaturas al final del trabajo) es 125. La experiencia que se tiene ha demostrado que el espesor que se requiere para esta temperatura es de 9 pulgadas, la capa externa del horno será cubierta con 3 pulgadas de fibra mineral cuya especificación según normas A.S.T.M. es C592-70. En seguida se detalla un cálculo que comprueba que los materiales y espesores son los adecuados para obtener una temperatura menor de 80°C. Un corte de las paredes se muestra en la figura (6) indicando los mate

riales que la componen, así como sus espesores y el perfil - de temperaturas.

Las conductividades térmicas de los materiales descritos anteriormente son:

$$K_{T-23}^{675^{\circ}\text{C}} = 2.42 \frac{\text{BTU plg.}}{\text{h}^{\circ}\text{F pie}^2}$$

$$K_{F.M}^{163^{\circ}\text{C}} = 0.41 \frac{\text{BTU plg.}}{\text{h}^{\circ}\text{F pie}^2}$$

Considerando que el flux de calor es unidimensional - en estado estable, se calculará por la siguiente ecuación. -- [9,10,12,14,16].

$$q_k = \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2}} \quad \text{-----} \quad (14)$$

En donde:  $q_k$  = flux de calor por conducción [  $\frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$  ]

$T_2$  = Temperatura de la superficie caliente ( $^{\circ}\text{F}$ )

$T_1$  = Temperatura de la superficie fría ( $^{\circ}\text{F}$ )

$x_i$  = Espesor del material "i" (plg.)

$k_i$  = Conductividad térmica del material "i" [  $\frac{\text{Btu plg.}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}$  ]

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (14), tenemos:

$$q_k = \frac{(950 - 75) 1.8 \text{ } ^\circ\text{F}}{\frac{9 \text{ plg.}}{2.42 \frac{\text{BTU plg.}}{\text{h-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}} + \frac{3 \text{ plg.}}{0.41 \frac{\text{BTU plg.}}{\text{h-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}} + \frac{1/8 \text{ plg.}}{312 \frac{\text{BTU plg.}}{\text{h-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}}}$$

$$q_k = 142.71 \frac{\text{BTU}}{\text{h-ft}^2}$$

En el régimen estable el flux de calor que se pierde a través de las paredes debe calcularse considerando los mecanismos de convección y radiación.

El calor total disipado desde la superficie del horno hacia el medio ambiente está dado por la siguiente ecuación. - [12,18].

$$Q_{r/c} = q_r + q_c = A h_r (T_1 - T_a) + A h_c (T_1 - T_a) \text{ ----- (15)}$$

en donde:

$q_r$  = flux de calor debido a la radiación [BTU/h pie<sup>2</sup>]

$q_c$  = flux de calor debido a la convección [BTU/h pie<sup>2</sup>]

$Q_{r/c}$  = flujo de calor considerando la radiación y convección [BTU/h]

A = área exterior del horno (pie<sup>2</sup>)

T<sub>1</sub> = temperatura de la carcasa (°F)

T<sub>a</sub> = temperatura ambiente (°F)

h<sub>c</sub> = coeficiente de transferencia de calor por convección [ $\frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$ ]

h<sub>r</sub> = coeficiente de transferencia de calor por radiación [ $\frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$ ]

los coeficientes de transferencia de calor (h<sub>r</sub> y h<sub>c</sub>) a su vez se definen como [12,16,18]

$$h_r = \sigma \times \epsilon \times \frac{\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_b}{100}\right)^4}{T_1 - T_a} \quad \text{-----} \quad (16)$$

$$h_c = F_1 (T_1 - T_a)^{0.25} \quad \text{-----} \quad (17)$$

en donde:

σ = constante de Stefan-Boltzman o coeficiente de cuerpo negro (0.173 x 10<sup>-8</sup> BTU/h pie<sup>2</sup> °R<sup>4</sup>)

ε = emisividad de la placa de acero cuando se pinta con pintura de aluminio = 0.47 [19]

T<sub>2</sub> = temperatura de carcasa del horno (°R)

T<sub>b</sub> = temperatura ambiente (°R)

F<sub>1</sub> = factor convectivo aplicado al flujo laminar y convección libre, para el aire tiene un valor de 0.3 a presión atmosférica. [18]

Por otra parte se habfa encontrado que las pérdidas - de calor (por el mecanismo de conducción a través de las paredes del horno) son

$$q_k = 142.71 \text{ BTU/h pie}^2.$$

Calculemos ahora la temperatura de la carcaza del horno, para esto usaremos un método de ensayo y error, en el cual iremos suponiendo temperatura de carcaza y calcularemos la cantidad de calor que se transfiere hacia el medio ambiente por los mecanismos, tanto de convección como de radiación - ya que estos dos mecanismos están involucrados en el proceso. Cuando encontremos que  $q_k = q_{r/c}$  habremos encontrado la temperatura de la carcaza.

Suponiendo una temperatura de carcaza de  $75^\circ\text{C}$   
(=  $167^\circ\text{F} = 627^\circ\text{R}$ .)

$$\begin{aligned} h_r &= 0.173 \frac{\text{BTU}}{\text{h-pie}^2 \text{ } ^\circ\text{R}^4} (0.47) \frac{\left(\frac{627}{100}\right)^4 - \left(\frac{528}{100}\right)^4}{167 - 68 \text{ } ^\circ\text{F}} \text{ } ^\circ\text{R}^4 \\ &= 0.631 \frac{\text{BTU}}{\text{h-pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \\ h_c &= 0.3 \frac{\text{BTU}}{\text{h-pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} (167 - 68)^{0.25} \\ &= 0.946 \frac{\text{BTU}}{\text{h-pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{r/c} &= (h_r + h_c) (T_1 - T_a) \\
 &= 1.577 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} (167-68) \text{ } ^\circ\text{F} \\
 &= 156.123 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}
 \end{aligned}$$

en este primer cálculo encontramos que  $q_k < q_{r/c}$ , por lo cual la temperatura de carcaza debe ser ligeramente menor. -  
 Suponiendo una temperatura de carcaza de  $70^\circ\text{C} = 158^\circ\text{F} = 618^\circ\text{R}$  tenemos:

$$q_{r/c} \text{ } 138.51 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}, \text{ y } q_k \text{ } 143 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

En este segundo cálculo encontramos que  $q_k > q_{r/c}$ , con este resultado deducimos que la temperatura de la carcaza debe estar entre  $70$  y  $75^\circ\text{C}$ .

Suponiendo una temperatura de  $72^\circ\text{C} = 161.6^\circ\text{F} = 621^\circ\text{R}$ .

$$q_{r/c} = 145.55 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

mientras que las pérdidas por conducción serán:

$$q_k = 143.19 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

Realizando dos cálculos adicionales, se encuentra que

la temperatura de carcaza es 71.5°C, mientras que el flux de calor desde la carcaza del horno hacia el medio ambiente es:

$$q_k = q_{r/c} = 143.68 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

Para la primera zona (zona para el calentamiento): -

Longitud de la primera zona es: 1.90 m.  
 ancho exterior del horno: 2.042 m.  
 altura exterior del horno: 1.381 m.

Las dimensiones exteriores corresponden a la suma de las dimensiones interiores del horno más el espesor de las pa redes, por lo que el área exterior de la primera zona será:

$$\begin{aligned} A &= 2 (\text{ancho} \times \text{largo}) + 2 (\text{largo} \times \text{altura}) + (\text{ancho} \times \text{altura}) \\ &= 2 (2.04 \text{ m} \times 1.90 \text{ m.}) + 2 (1.9 \text{ m.} \times 1.381 \text{ m.}) + (2.04\text{m.} \times 1.38\text{m.}) \\ &= 15.82 \text{ m}^2 = 170.28 \text{ pie}^2 \end{aligned}$$

por lo cual las pérdidas de calor a través de las paredes serán:

$$Q_{r/c} = 143.68 \frac{\text{BTU}}{\text{h-pie}^2} \times 170.28 \text{ pie}^2 = 24,466.56 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

El calor total requerido en la primera zona será:

$$Q_T = Q_{\text{engranes}} + Q_{\text{charolas}} + Q_{r/c} + Q_{g.c.}$$

$$= 141,702 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}} + 34,482.7 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}} + 24,466.56 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}} + 73,315.53 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}}$$

$$= 273,966.79 \frac{\text{BTU}}{\text{h.}}$$

Esta cantidad de calor deberá ser proporcionado por el sistema de calentamiento, el cual estará formado por quemadores (tubos radiantes) que deberán ser corregidos por un factor de altura ya que los quemadores proporcionan su máxima eficiencia a nivel del mar. Esta eficiencia disminuye al aumentar la altura a la que se instalen. Por otra parte, la cantidad de calor total también deberá corregirse sumándole las pérdidas por "cuerpo negro" ya que cada vez que la puerta del honro se abra, una apreciable cantidad de calor se transferirá por el mecanismo de radiación hacia el medio ambiente. En la tabla (4) se ilustran las pérdidas de calor por el efecto del cuerpo negro a diferentes temperaturas.

En muchos procesos industriales se utilizan quemadores cuyo diseño se basa en el principio de la utilización de las flamas en el calentamiento de alguna superficie, para que ésta a su vez radíe calor sobre la carga. Entre los quemadores que se utilizan para este fin se encuentran los denominados de tubos radiantes, en estos quemadores se efectúa la combustión dentro de unos tubos, de tal forma que los gases pro-



ducidos durante la combustión calientan dichos tubos, los cuales transfieren calor hacia la carga.

Además los tubos radiantes evitan el contacto de los gases de combustión con la carga y pueden ser construidos en materiales cerámicos o metálicos. Su rango de trabajo se encuentra entre 700 y 2500°F [16].

Los quemadores de tubos radiantes son la base de muchos hornos industriales usados para tratamientos térmicos y procesos de recocido en los cuales la contaminación de atmósferas dentro de los mismos, por productos de combustión, no son deseadas.

### III.2.3. CALOR TRANSFERIDO POR LOS GASES DE COMBUSTION HACIA LOS TUBOS RADIANTES.

Los gases cuyas moléculas son simétricas tales como:  $O_2$ ,  $H_2$  y  $N_2$  tienen emisividades muy bajas, tanto que para fines de diseño pueden considerarse nulas. Por otra parte moléculas heteropolares tales como  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $SO_2$  tienen emisividades que son de importancia en equipos de transferencia de calor. [9,10,18]

La Concentración de las moléculas gaseosas radiantes-

se mide por su presión parcial, las emisividades son aditivas aún cuando se deba hacer una pequeña corrección por la interferencia radiante de un tipo de moléculas con la radiación de otras. Para calcular la emisividad de una masa de gases se deben tomar en cuenta las temperaturas tanto de la fuente como el receptor.

El combustible que el cliente pretende utilizar para su horno es gas natural, el gas natural mexicano tiene la siguiente composición promedio:

<u>NOMBRE</u>	<u>FORMULA</u>	<u>PORCENTAJE</u>
metano	CH <sub>4</sub>	89.6%
etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.4%
nitrógeno	N <sub>2</sub>	1.9%

El poder calorífico del gas natural es de 967 BTU/pie<sup>3</sup> (datos proporcionados por PEMEX)<sup>[7]</sup>, aunque dependiendo de la localización del yacimiento, puede haber variaciones, no muy significativas.

La entalpia de reacción para cualquier proceso de combustión está dado por la siguiente reacción.

$$H = H_p - H_R \quad \text{----- (18)}$$

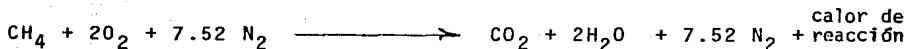
donde:

$H$  = entalpia de reacción.

$H_P$  = suma de entalpias de productos.

$H_R$  = suma de entalpias de reactivos.

Por lo cual, para la combustión del componente principal del gas natural, con aire tenemos:



$$\begin{aligned} \text{calor de reacción} = & \left[ m_{\text{CO}_2} C_{P_{\text{CO}_2}} (T_f - T_b) + m_{\text{H}_2\text{O}} C_{P_{\text{H}_2\text{O}}} (T_f - T_b) + \right. \\ & \left. + m_{\text{N}_2} C_{P_{\text{N}_2}} (T_f - T_b) \right] - \left[ m_{\text{CH}_4} C_{P_{\text{CH}_4}} (T_b - T_a) + \right. \\ & \left. + m_{\text{O}_2} C_{P_{\text{O}_2}} (T_b - T_a) + m_{\text{N}_2} C_{P_{\text{N}_2}} (T_b - T_a) \right] = H_{\text{comb.}} \end{aligned}$$

Suponiendo que la reacción se realiza en dos etapas, - ambas a presión constante, en la primera etapa los reactivos - pasan a productos a la misma temperatura.



En la segunda etapa los productos pasan de la tempera

tura base ( $T_b$ ) hasta la temperatura de flama ( $T_f$ ) a la misma - presión

Productos ( $T_b, p$ )  $\longrightarrow$  Productos ( $T_f, p$ )  $H_{comb}$

Considerando que es un proceso adiabático y debido a que la temperatura base ( $T_b$ ) es igual a la temperatura ambiente ( $T_a$ ), su diferencia es cero, por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$(T_f - T_b) (m_{CO_2} C_{P_{CO_2}} + m_{N_2} C_{P_{N_2}} + m_{H_2O} C_{P_{H_2O}}) = H_{comb.}$$

donde:

$T_a$  = temperatura ambiente.

$T_f$  = temperatura de flama.

$T_b$  = temperatura base.

$m_i$  = peso molecular del compuesto "i" (g/mol).

$C_{p_i}$  = capacidad calorífica del compuesto "i" (cal/g°C)

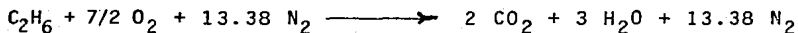
$$T_f = \frac{H_{comb.}}{m_{CO_2} C_{P_{CO_2}} + m_{N_2} C_{P_{N_2}} + m_{H_2O} C_{P_{H_2O}}} + T_b$$

sustituyendo valores, recopilados en la tabla (2) tenemos:

$$T_f = \frac{212,800 \text{ cal/mol}}{44 \text{ g/mol} (0.29 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) + 210 \text{ g/mol} (0.27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) + 36(0.57)} + 25$$

$T_f = 2389.97^\circ\text{C}$  (temperatura de flama).

para la combustión del etano más 1.9% de  $\text{N}_2$  presente en el gas natural, tenemos:



por la misma razón que para el caso del metano, la temperatura de flama estará dada por la siguiente ecuación:

$$T_f = \frac{406,000 \text{ cal./mol}}{88 \text{ g/mol} (0.29 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) + 375 \text{ g/mol} (0.27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}) + 54(0.57)} + 25$$

$$T_f = 2,583.11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Debido a que el gas natural es una mezcla de metano, etano y nitrógeno, la temperatura de flama adiabática estará regulada por la fracción mol de cada uno de sus componentes [12], de tal forma que la temperatura del gas natural la podemos calcular mediante la siguiente ecuación:

$$T_f (\text{gas natural}) = T_f(\text{metano}) (X_{\text{metano}}) + T_f(\text{etano}) (X_{\text{etano}})$$

en donde:

$T_f$  = temperatura de flama adiabática de cada uno de los componentes.

$X$  = fracción mol de cada uno de los componentes.

$$\begin{aligned}
 T_{f(\text{gas natural})} &= 0.896 (2389.97^{\circ}\text{C}) + 0.102 (2583.11^{\circ}\text{C}) \\
 &= 2,407.47^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

La temperatura de flama adiabática calculada anteriormente no debe considerarse en la práctica, para el diseño de hornos industriales, debido a que hay una disminución de temperatura causada por el rompimiento de las moléculas de los productos de combustión; el dióxido de carbono se disocia para formar monóxido de carbono y oxígeno atómico, mientras que la molécula de agua se disocia para formar hidrógeno molecular y oxígeno atómico. De acuerdo a la teoría cinética se ha comprobado que la relación de disociación aumenta más rápido que el aumento de la temperatura. Esta energía utilizada para lograr la disociación de los productos de combustión abate la temperatura de flama entre un 14 y un 17% [17].

Considerando que disminuye la temperatura de flama en el límite superior, tenemos:

$$\begin{aligned}
 T_{f(\text{real del gas natural})} &= 2,407.47^{\circ}\text{C} \times 0.83 \\
 &= 1998.2^{\circ}\text{C} = 3,628^{\circ}\text{F}
 \end{aligned}$$

la transferencia de calor de los gases de combustión hacia los tubos radiantes la podemos calcular con la siguiente ecuación [14]

$$Q = 0.173 \left[ (\epsilon_C + \epsilon_W)_{T_G} \left( \frac{T_G}{100} \right)^4 - (\epsilon_{TR})_{T_b} \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right] A \text{---(20)}$$

en donde:

$(\epsilon_C + \epsilon_W)_{T_G}$  = emisividad de los productos de combustión a  $T_G$

$\epsilon_C$  = emisividad del  $CO_2$  a  $P_{CO_2} \cdot L$  y  $T_G$

$\epsilon_W$  = emisividad del  $H_2O$  a  $P_{H_2O} \cdot L$  y  $T_G$

$(\epsilon_{TR})_{T_b}$  = emisividad del gas a  $T_b$

$P$  = presión parcial del componente referido.

$L$  = longitud de los tubos radiantes.

$T_G$  = temperatura de flama.

$T_b$  = temperatura de los tubos radiantes.

La composición de los gases de combustión, tomando como base un pie cúbico de gas natural es la siguiente:

0.896 pie<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> producen: 0.896 pie<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> + 1.792 pie<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O + 6.73 pie<sup>3</sup> N<sub>2</sub>

0.084 pie<sup>3</sup> C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> producen: 0.169 pie<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> + 0.252 pie<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O + 1.12 pie<sup>3</sup> N<sub>2</sub>

sumando términos tenemos:

1.064 pie<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>

2.044 pie<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O

7.850 pie<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>

7.850 pie<sup>3</sup>  
Volumen total: 10.96 pie<sup>3</sup>

A presión atmosférica, las presiones parciales de los gases de combustión serán (% mol = % volumen).

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{1.064}{10.96} = 0.097$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2.044}{10.96} = 0.186$$

$$X_{\text{N}_2} = \frac{7.85}{10.96} = 0.716$$

Por otra parte sabemos que para un sistema formado por una mezcla gaseosa se cumple la siguiente relación:

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n_T} = X_i$$

por lo cual:  $P_i = X_i P$ , de donde:

$P_i$  = presión parcial del componente.

$P$  = presión total del sistema.

$n_i$  = número de moles del componente "i".

$n_T$  = número de moles totales.

$X_i$  = fracción mol del componente "i".

La presión parcial de cada uno de los componentes de la mezcla gaseosa de los productos de combustión serán:



$$P_{\text{CO}_2} = 0.097 \times 1.0 \text{ atm.} = 0.097 \text{ atm.}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.186 \times 1.0 \text{ atm.} = 0.186 \text{ atm.}$$

$$P_{\text{N}_2} = 0.716 \times 1.0 \text{ atm.} = 0.716 \text{ atm.}$$

La longitud de los tubos radiantes colocados lateralmente en la zona de calentamiento es de 1.98 m. (esta longitud es suficiente para transferir la cantidad requerida por el horno además que con esta longitud se asegura que la carga permanecerá 2.0 horas en la zona de calentamiento). Por otra parte, el diámetro de los tubos es 6.0 pulgadas (0.152 m.)

Para calcular la emisividad de los gases de combustión tenemos que la longitud promedio de los haces radiantes para una forma cilíndrica está dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} L &= 1.0 \times \text{diámetro} \\ &= 1.0 \times 0.152 \text{ m.} \\ &= 0.152 \text{ m.} \end{aligned}$$

Por lo cual, el producto de la presión parcial por la longitud promedio de los productos de combustión con emisividad significativa será:

Para el  $\text{CO}_2$ :

$$P \times L = 0.097 \text{ atm.} \times 0.152 \text{ m.} = 0.0148 \text{ atm.-m.}$$

Para el H<sub>2</sub>O:

$$P \times L = 0.186 \text{ atm.} \times 0.152 \text{ m.} = 0.0283 \text{ atm.} - \text{m.}$$

de las gráficas de las figuras (7) y (8) tenemos:

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{4089 \text{ } ^\circ\text{R}} = 0.021 \text{ y } c_p = 1.0 \text{ por lo que}$$

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{4089 \text{ } ^\circ\text{R}} \text{ corregida} = 0.021$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{4089 \text{ } ^\circ\text{F}} = 0.013 \text{ y } c_p = 1.1 \text{ por lo que}$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{4089 \text{ } ^\circ\text{R}} \text{ corregida} = 0.0143$$

La suma de las emisividades corregidas del CO<sub>2</sub> y del H<sub>2</sub>O será:

$$\epsilon_{\text{CO}} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \text{ gases de combustión} = 0.0353 \text{ (a } 4089 \text{ } ^\circ\text{R)}$$

así, el factor para corregir el efecto "opaco" o interferencia entre el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O

$$\frac{P_w}{P_c + P_w} = \frac{0.186}{0.097 + 0.186} = 0.657$$

$$P \times L_{\text{CO}_2} + P \times L_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0431$$

y de la gráfica de la figura (9) tenemos

$$= 0.001$$

Las temperaturas en los diferentes puntos del horno, para una adecuada operación del mismo serán las siguientes:

$T_{\text{máxima de carga}}$	=	925 °C	=	1697 °F	=	2157 °R
$T_{\text{tubos radiantes}}$	=	950 °C	=	1742 °F	=	2202 °R
$T_{\text{salida de gases}}$	=	1050 °C	=	1922 °F	=	2382 °R
$T_{\text{real de flama}}$	=	1998 °C	=	3629 °F	=	4089 °R

Estas temperaturas concuerdan con las reportadas por constructoras de hornos, cuando éstos operan para procesos de cementado. [16]

La temperatura de salida de los gases de combustión es 50°C arriba de la temperatura de los tubos radiantes para asegurar que los gases siempre transfieran calor hacia los tubos. Mientras que la temperatura de los tubos radiantes es 25°C mayor a la requerida por la carga, para que los tubos radien calor hacia la carga.

En general, la temperatura de los gases a la salida del horno debe ser alrededor de 100°C mayor que la fuente que radfe calor hacia la carga, para asegurar que siempre exista

la transferencia de calor hacia la misma.

Cálculo de la emisividad de los gases de salida:

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{2382 \text{ }^\circ\text{R}} = 0.049 \text{ y } c_p = 1.0; \text{ por lo que}$$

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{\text{corregida } 2382 \text{ }^\circ\text{R}} = 0.049$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{2382 \text{ }^\circ\text{R}} = 0.037 \text{ y } c_p = 1.1; \text{ por lo que}$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{corregida } 2382 \text{ }^\circ\text{F}} = 0.047$$

Entonces, el calor total aprovechable por el proceso-bajo el mecanismo de radiación (de acuerdo a la ecuación (20)) será:

$$q_r = 0.173 \left[ (\epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}})_{T_G} \left( \frac{T_G}{100} \right)^4 - (\epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}})_{T_b} \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 0.173 \left[ (0.035) \left( \frac{4089 \text{ }^\circ\text{R}}{100} \right)^4 - (0.0897) \left( \frac{2382 \text{ }^\circ\text{R}}{100} \right)^4 \right]$$

$$q_r = 12,187.62 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

Además, debido a que los gases de combustión que circulan dentro de los tubos radiantes viajan a una cierta velocidad, deben transferir una cierta cantidad de calor por el mecanismo de convección. En este cálculo debemos partir de la siguiente información:

Para túneles de combustión en quemadores de flama luminosa cuando la combustión se realiza en forma estequiométrica y se utiliza aire a una presión de 14 pulgadas (columna de agua), la velocidad de salida de los gases de combustión en la boquilla tiene un rango de 9000 a 11000 pie/minuto, a una temperatura de 3660 °F [18]

Como sabemos; los procesos de transferencia de calor por convección, están íntimamente relacionados con el movimiento del fluido por lo cual se hace necesario conocer las propiedades del mismo. Uno de los aspectos más importantes es establecer si el movimiento del fluido se efectúa en el régimen laminar o turbulento, para esto es necesario evaluar el número de Reynolds. En el cálculo de este número requerimos tanto el valor de la densidad como el de la viscosidad de los gases de combustión a la temperatura real de la flama. Estos datos no se encuentran en tablas y deben calcularse.

La viscosidad de la mezcla de gases de combustión a 1.0 atmósferas de presión y 1998 °C = 3628 °F está definida -

por la siguiente ecuación.

$$\sum_{j=1}^n \mu_{mezcla} = \frac{X_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n X_i \Phi_{ij}} \quad \text{-----(21)}$$

en la que

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{81}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2 \quad \text{--(22)}$$

En las ecuaciones (21) y (22), "n" es el número de especies químicas existentes en la mezcla;  $X_i$  y  $X_j$  son las fracciones molares de las especies  $i$  y  $j$ ;  $\mu_i$  y  $\mu_j$  son las viscosidades de las especies  $i$  y de  $j$  a la temperatura del sistema; y  $M_i$  y  $M_j$  son los pesos moleculares correspondientes. Se puede ver que  $\Phi_{ij}$  es un número adimensional y que  $\Phi_{ij}$  es igual a uno cuando  $i$  es igual a  $j$ . Se ha comprobado experimentalmente que la ecuación (21) reproduce valores de  $\mu_{mezcla}$  con una desviación media del orden del 2.0%.

TABLA DE VALORES REQUERIDOS PARA LAS ECUACIONES (21) y (22)

Sustancia	Fracción mol (X)	Peso molecular (M)	Viscosidad (Lb/pie-seg)	Referencia
CO <sub>2</sub>	0.097	44.01	4.53 x 10 <sup>-5</sup>	(1)
H <sub>2</sub> O	0.186	18.00	4.42 x 10 <sup>-5</sup>	(2)
N <sub>2</sub>	0.716	28.016	3.47 x 10 <sup>-5</sup>	(3)

Sustituyendo los valores anteriores en forma adecuada en la ecuación (21), obtenemos la siguiente tabla de valores.

i	j	M <sub>i</sub> /M <sub>j</sub>	$\mu_{i/j}$	$\Phi_{ij}$	$\sum_{j=1}^3 x_i \Phi_{ij}$
1	1	1.000	1.000	1.000	0.857
	2	2.445	1.025	0.624	
	3	1.571	1.305	0.900	
2	1	0.409	0.977	1.488	1.339
	2	1.000	1.000	1.000	
	3	0.639	1.273	1.409	
3	1	0.636	0.766	1.083	0.984
	2	1.556	0.785	0.875	
	3	1.000	1.000	1.000	

Sustituyendo los valores en la ecuación (21) en forma adecuada, tenemos:

$$\begin{aligned} \mu_{mez.c.} &= \frac{0.97 (4.5 \times 10^{-5})}{0.857} + \frac{0.186 (4.42 \times 10^{-5})}{1.339} + \frac{0.716 (3.47 \times 10^{-5})}{0.984} \\ &= 8.23 \times 10^{-5} \quad \frac{\text{Lb}}{\text{pie seg}} \end{aligned}$$

Por otra parte, debido a que los datos de densidad de los gases de combustión solo se encuentran en la literatura -

tabulados hasta 1500 °F [9, 12], debemos extrapolar hasta la temperatura en la que éstos se encuentren. Sabemos que:

$$\begin{aligned}
 e_{\text{mezcl.}} &= e_i \times X_i \\
 &= 0.716(0.0197) + 0.097(0.0308) + 0.186(0.01265) \\
 &= 0.0194 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}
 \end{aligned}$$

y corrigiendo este valor a la temperatura de flama tenemos:

$$\text{mezcl. real} = \frac{0.0194 \times 1960}{4065} = 0.0093 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}$$

Como ya se ha mencionado, las velocidades de los gases de combustión que circulan dentro de los tubos radiantes se encuentran en el rango de los 9,000 a 11,000 pie/min; por lo que, el número de Reynolds en estos límites será.

Para el límite inferior.

$$\begin{aligned}
 \text{Re} &= \frac{150 \text{ pie/seg} \times 0.5 \text{ pie} \times 0.0093 \text{ Lb/pie}^3}{8.23 \times 10^{-5} \text{ Lb/pie seg.}} \\
 &= 8,475.09
 \end{aligned}$$

Para el límite superior.



$$Re = \frac{183.3 \text{ pie/seg} \times 0.5 \text{ pie} \times 0.0093 \text{ lb/pie}^3}{8.23 \times 10^{-5} \text{ Lb/pie seg.}}$$

$$= 10,356.56$$

Como puede apreciarse ambos valores del número de Reynolds indican que el flujo se encuentra en el régimen turbulento. Bajo estas condiciones cuando el flujo se encuentra circulando en tubos lisos Dittus y Boelter [9, 18] recomiendan usar la siguiente ecuación.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \text{ ----- (23)}$$

donde:

Nu = Número de Nusselt

Pr = Número de Prandtl

Re = Número de Reynolds

n = 0.4 para calentamiento.

n = 0.3 para enfriamiento.

Entonces de acuerdo a la ecuación (23), el número de Nusselt, cuando la velocidad de los gases es de 9,000 pie/min., tiene el siguiente valor.

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.023 (8475.09)^{0.8} (0.695)^{0.4} \\ &= 27.60 \end{aligned}$$

Pero cuando la velocidad de los gases es 11,000 pie/min; el número de Nusselt es:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.023 (10,365.56)^{0.8} (0.695)^{0.4} \\ &= 32.43 \end{aligned}$$

tomando un valor promedio entre estos dos valores, tenemos:

$$\text{Nu} = (27.60 + 32.43) 0.5 = 30.015$$

Si el coeficiente de transferencia de calor está definido por [18]

$$h_c = \frac{\text{Nu} \cdot K}{d_o}$$

donde:

$h_c$  = coeficiente de calor por convención.

Nu = Número de Nusselt

K = Conductividad térmica de los gases de combustión.

$d_o$  = Diámetro interno de los tubos.

sustituyendo valores tenemos:

$$h_c = \frac{30.015 (0.0751 \text{ BTU/h pie } ^\circ\text{F})}{0.5 \text{ pie}}$$
$$= 4.5 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}}$$

entonces, el calor aprovechable por el mecanismo de convención será:

$$q_c = 4.5 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}} (3629 - 1742) \text{ } ^\circ\text{F}$$
$$= 8,491.5 \text{ BTU/h pie}^2$$

por lo tanto el "flux" de calor total útil será:

$$q_t = q_r + q_c$$
$$= 12,187.62 + 8491.5$$
$$= 20,679.12 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2}$$

Para calcular el calor disponible se necesita de lo siguiente:

Area de los tubos radiantes laterales, que tienen forma de "U"

Longitud = L = 1.9 m. x 2 = 3.8 m.

diámetro = d = 0.152 m. = 0.5 pie

Area = A

$$A = \pi \times d \times L = 0.5 \text{ pie} \times (3.8 \text{ m} \times \frac{1}{0.3048}) = 19.39 \text{ pie}^2$$

$$\text{Area de los 2 tubos} = 19.39 \text{ pie}^2 \times 2 = 38.78 \text{ pie}^2$$

Area del tubo del techo:

$$\text{Longitud} = 1.51 \text{ m.} \times 2 = 3.02 \text{ m.} \approx 9.91 \text{ pie}$$

$$A = (0.5 \text{ pie}) \pi (9.91 \text{ pie}) = 15.56 \text{ pie}^2$$

$$\text{Area total} = A_t = 15.56 + 38.78 = 54.34 \text{ pie}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Calor disponible} &= 20,679.12 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \frac{\text{pie}^2}{\text{pie}^2} (54.34 \text{ pie}^2) \\ &= 1,123,703.40 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Como ya se ha calculado anteriormente, el calor demandado por el horno es 273,966.76 BTU/h. Por otra parte, el cliente pretende instalar el horno en la ciudad de México en la cual la altura sobre el nivel del mar es 2280 m. y su factor de altura [21] es 0.772 entonces el calor corregido tendrá un valor de:

$$\frac{273,966.76 \text{ BTU/h}}{0.772} = 354,879.22 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

La eficiencia del proceso la podemos calcular de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$= \frac{T_f - T_{sg}}{T_f - T_b} \times 100 \text{ ----- (24)}$$

donde:

$\eta$  = eficiencia

$T_f$  = temperatura de flama

$T_{sg}$  = temperatura de salida de los gases

$T_b$  = temperatura base (ambiente)

sustituyendo valores en la ecuación (24) obtenemos:

$$\eta = \frac{3629 - 1922}{3629 - 68} \times 100 = 47.93 \%$$

Por lo cual el calor efectivo será:

$$\frac{354,879.22 \text{ BTU/h}}{0.4793} = 740,411.48 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

Además, el horno por ser continuo deberá abrir sus -  
puertas cada hora en un lapso no mayor de 5 minutos a la tem-  
peratura de operación.

Durante este tiempo habrá pérdidas de calor por el -  
efecto del "cuerpo negro", estas pérdidas las podemos evaluar  
usando la tabla (4) [15].

Calor por cuerpo negro = q (B.B)

$$\begin{aligned}
 q(\text{B.B}) \text{ a } 1742 \text{ } ^\circ\text{F} &= 71,100 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2} \times \frac{5 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \times 2 \\
 &= 11,850 \frac{\text{BTU}}{\text{h pie}^2} (6.85 \text{ pie}^2) \\
 &= 81,250.84 \text{ BTU/h}
 \end{aligned}$$

Finalmente, el calor total será  $(740,411.48 + 81,250.84)$   
 $= 821,662.32 \text{ BTU/h}$

Como puede verse, el calor total disponible es mayor-  
 el calor necesitado en el calentamiento.

DESCRIPCION DEL EQUIPO PERIFERICO DEL HORNO.

Finalmente, el equipo propuesto estará formado por -  
 los siguientes elementos:

Referencia	Cantidad	Descripción.
(1)	6 pzas.	quemadores de tubos radiantes con capacidad de 571,000 BTU/h.
(2)	1 pza.	turboventilador con capacidad de 30000 pie <sup>3</sup> /h levantando una presión de 24 onzas/pie <sup>2</sup> ; cuando trabaja con aire a temperatura y presión normales, incluye motor eléctrico de 7.5 H.P.

Referencia	Cantidad	Descripción
(3)	1 pza.	filtro silenciador.
(4)	1 pza.	regulador de presión con capacidad de 3000 pie <sup>3</sup> /h para bajar de una presión de entrada de 25 psig. a una presión de salida ajustable de 14 a 30 pulgadas columna de agua.
(5)	6 pzas.	válvulas mariposa manuales, de 1 -- pulgada de diámetro.
(6)	1 pza.	válvula proporcional, de 2.5 pulgadas de diámetro.
(7)	6 pzas.	válvulas de orificio limitante de una pulgada de diámetro.
(8)	6 pzas.	pilotos de gas de encendido eléctrico.
(9)	3 pzas.	válvulas macho de 2.5 plg. de diámetro.
(10)	1 pza.	válvula macho de 1/2 plg. de diámetro.
(11)	1 pza.	válvula de control tipo mariposa, de 4 plg. diámetro, acoplada a actuador eléctrico.

Referencia	Cantidad	Descripción
(12)	1 pza.	manómetro, escala de 0 a 7 Kg/cm <sup>2</sup> , de 2.5 plg. de diámetro de carátula.
(13)	3 pzas.	manómetros con escala de 0 a 32 onzas por pulgada cuadrada, 2.5 plg. de diámetro de carátula.
(14)	6 pzas.	válvulas solenoides normales cerradas, de 3/8 plg. de diámetro.
(15)	1 pza.	válvula de seguridad con restablecimiento automático, de 2.5 plg. de diámetro.
(16)	1 pza.	válvula solenoide normalmente abierta de 1.5 plg. de diámetro.
(17)	1 pza.	válvula de seguridad con restablecimiento manual, de 2.5 plg. de diámetro.
(18)	1 pza.	interruptor de presión bajo del gas.
(19)	1 pza.	interruptor de alta presión del gas.
(20)	1 pza.	interruptor de baja presión del aire.

Estos equipos así como la conexión entre ellos se puede ver en el diagrama de combustión al final del presente trabajo



## C A P I T U L O   I V

### ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los cálculos desarrollados en este trabajo se han encontrado los resultados que a continuación se analizan.

1.- Para cementar piezas construídas en acero AISI---8620 y dar una concentración en su superficie de 0.8 % de carbono, a una temperatura de 925° C, se requiere de una atmósfera carburante que contenga 19.824 % de CO y 0.176 % de CO<sub>2</sub>. La concentración en la superficie es un requisito necesario - para que las piezas tengan una dureza de 68 Rockwell-C después del temple.

En este punto se puede ver que las variables que se involucran en el proceso de cementado son: la temperatura de tratamiento, la concentración de la atmósfera carburante y el tiempo de tratamiento, ésta última variable puede disminuir siempre y cuando la temperatura se incremente, esto no siempre es recomendable ya que la durabilidad de los equipos y materiales que se encuentren dentro del horno disminuye considerablemente.

Por otra parte en lo que se refiere a la atmósfera -- carburante, la composición de ésta corresponde a la de un gas endotérmico el cual es el recomendable para el proceso de cementado.

2.- La cantidad de calor requerido por el proceso (calor-necesario para elevar la temperatura de la piezas de trabajo- y charolas, además de las pérdidas a través de las paredes y calor absorbido por el gas carburante) es de 273.966.76  $\frac{\text{BTU}}{\text{h}}$ , - aunque esta energía después de ser corregida por los efectos- del "cuerpo negro", se incrementa hasta 821,662.32  $\frac{\text{BTU}}{\text{h}}$ ; por - lo cual, la cantidad de calor real que deberá ser proporcionado por los tubos radiantes, que a su vez recibirán la energía térmica proveniente de la combustión del gas natural que se - efectuará en quemadores de diseño especial. Estos quemadores- en la industria se les conoce como quemadores de tubos radiantes.

Puede notarse que la capacidad de dos quemadores es - suficiente para cubrir la demanda del horno, aunque se está - sugiriendo que se utilicen 6 quemadores. La razón de la utili- zación de 6 quemadores es debido a la necesidad que tiene el- proceso de la uniformidad de temperatura en todos los puntos- del horno, si se utilizarán dos quemadores se correría el --- riesgo de tener puntos frios en la carga y con esto provocar-

diferencia en las propiedades finales de las piezas que se están tratando.

## V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han mostrado las bases teóricas para el diseño de un horno de carburizado.

Los materiales y equipos requeridos para la construcción de este horno son fácilmente adquiribles en México por lo cual su construcción es posible ya que existe la capacidad técnica necesaria para efectuar el trabajo; tanto en el diseño, como en la construcción y puesta en operación.

## VI. REFERENCIAS

Las referencias están indicadas a lo largo de la tesis, mediante un paréntesis cuadrado en la parte superior de cualquier dato importante, los números que se encuentran dentro de dicho paréntesis indican el número de la referencia -- que a continuación se enlista.

### 1.- SOURCE BOOK ON HEAT TREATING

Volumen II Production and Engineering Practices  
Compiled by The Periodical Publication Department  
American Society for Metals  
2 nd. Ed.

- 2.- Carburizing and Carbonitriding  
Prepared under the direction of the  
ASM COMMITTEE ON GAS CARBURIZING
  
- 3.- Principles of Heat Treatment of Steel  
George Krauss  
American Society for Metals  
Metals Prk, Ohio 44073  
pgs. 247 - 272
  
- 4.- Physical Metallurgy for Engineers  
2nd. Ed.  
Donald S. Clark, Ph. D. and Wilbur R. Varney, M.S.  
pgs. 248 - 270
  
- 5.- Principles of Physical and Chemical Metallurgy  
Giles F. Carter  
American Society for Metals  
pgs. 238 - 241; 251 - 254
  
- 6.- Industrial Heating  
The journal of thermal technology  
August, 1982
  
- 7.- Boletfn PEMEX  
Posa Rica, Ver. Complejo Industrial  
Petr6leos Mexicanos 1986

- 8.- **Fundamentals of Physical Metallurgy**  
John D. Varhoeven  
John Wiley & Sons, New York  
pgs. 137 - 146
- 9.- **Principles of Heat Transfer**  
3 rd. Ed.  
Frank Kreith  
Harper & Row Publishers  
pgs. 219 - 286, 415 - 445, 633
- 10.- **Heat Transmission, 3 rd. Ed.**  
William H. Mc. Adams  
Mc. Graw Hill book Company. Inc.  
pgs. 72 - 115, 205. - 252
- 11.- **Transport Phenomena in Metallurgy**  
G. H. Geiger  
Addison-Wesley Publishing Company  
pgs. 473 - 486
- 12.- **North American Combustion Handbook**  
published by North American Manufacturing Co.  
Cleveland Ohio, 1952
- 13.- **Industrial Heating**  
The journal of Thermal Technology  
August, 1984

pgs. 22 - 24

14.- Procesos de Trnsferencia de calor

por Donal Q. Kern

Compañía Editorial Continental, S. A. México

pgs. 767 - 812

15.- Efeco Data Sheet

Industrial Combustion Division

Eclipse Fuel Engineering Company

Rockford Illionois

pgs. 207 - 215

16.- Industrial Furnaces Vol. I

W. Trinks and M. W. Mawhinney

4<sup>ht</sup> Ed.

John Wiley & Sons, Inc. New York, London, Sydeny

17.- Industrial Furnaces Vol. II

W. Trinks and M. W. Mawhinney

4<sup>ht</sup> Ed.

John Wiley & Sons, Inc, New York, London, Sydeny

18.- Gas Engineers Handbook

Fuel gas Engineering Practices

Edited by Insustrial Press

5<sup>ht</sup> Ed. 1966 New York

pgs. 2/1 - 2/148

**19.- Literature Review of**

**Ingra-red energy**

**Produced with Gas Burners**

**by D. W. De Werth**

**Research Bulletin 83, May. 1960**

**20.- A STUDY OF INFRA/RED ENERGY**

**GENERATED BY RADIANT GAS BURNERS**

**By D.W. DE Werth**

**Research Bulletin 92, November 1962**

**21.- Manual SELMEC**

**Undecima Edición, 1979**

**Sociedad Electromecánica S. A.**

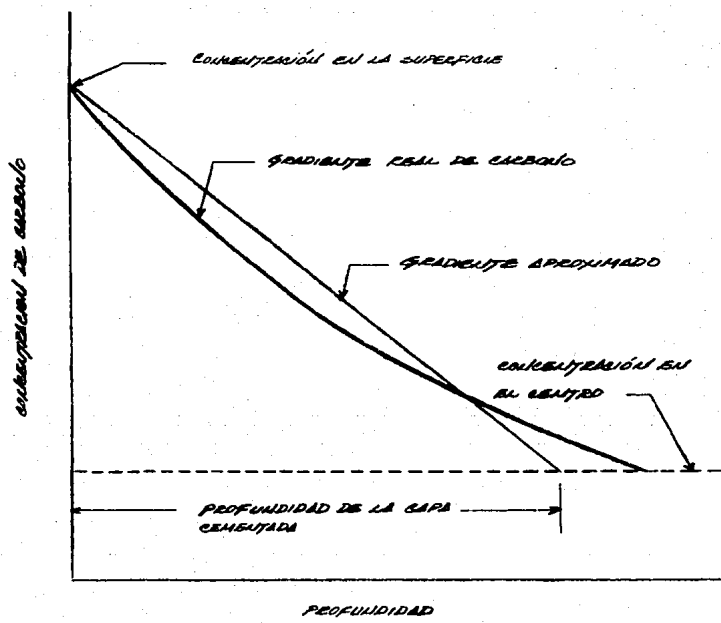
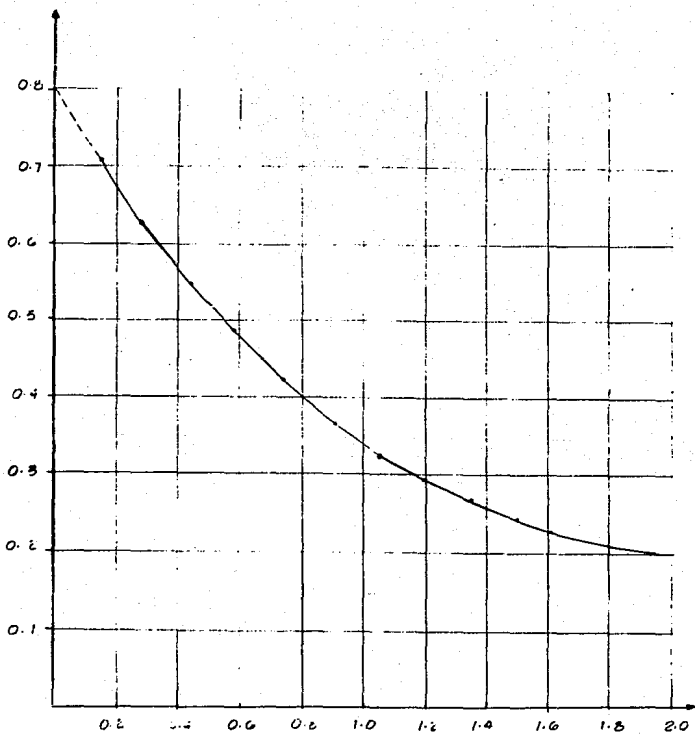


FIG. (1) GRADIENTE TIPO EN LA CARBURIZACION DE ACEROS DE BAJO CARBONO Y BAJA ALIACION

(Tomada de Carburizing and Carbonitriding, ASM pg. 7)



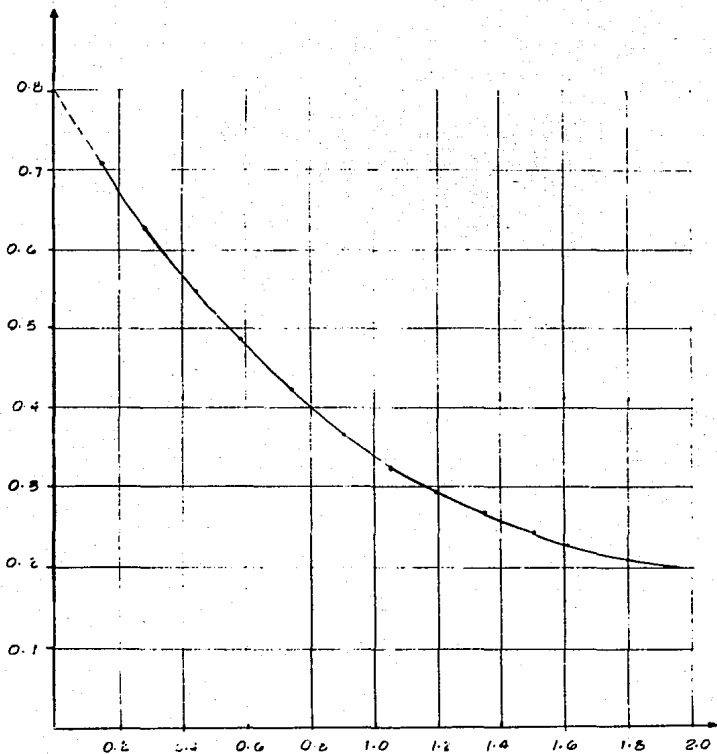
PORCIENTO DE CARBONO



DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (m)

FIG.(2) VARIACION DEL CONTENIDO DE CARBONO CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD

PORCIENTO DE CARBONO



DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (M.M.)

FIG. (2) VARIACION DEL CONTENIDO DE CARBONO CON RELACION  
A LA PROFUNDIDAD

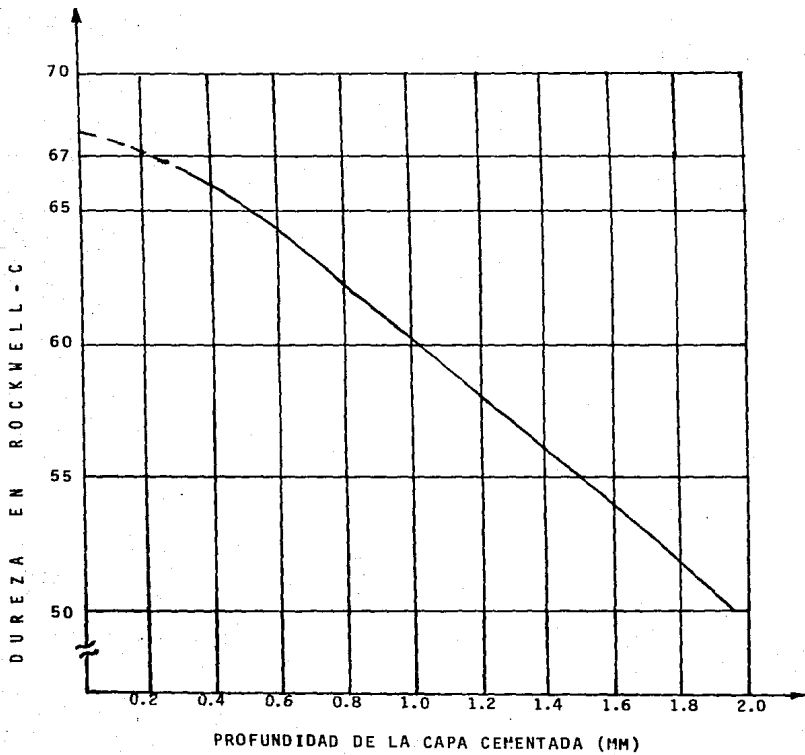


Fig. (3) Variación de dureza en función de la profundidad de la capa cementada.

(Tomado de Physical Metallurgy Principles, Robert E. Reed-Hill).

DUREZA VICKERS

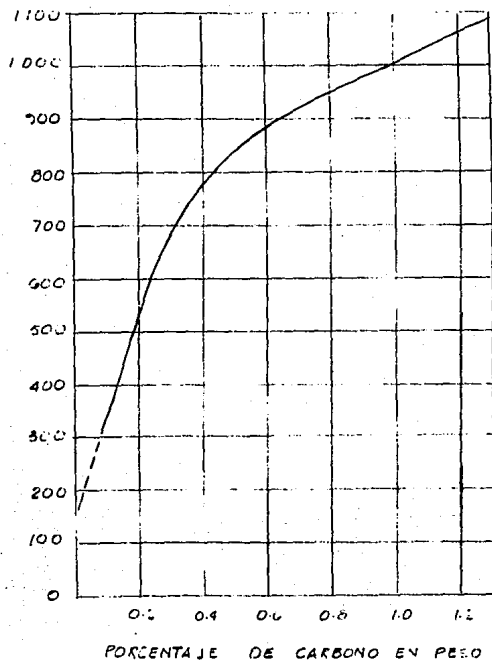


FIG (3\*) VARIACION EN LA DUREZA DE LA MARTENSITA EN FUNCION DEL CONTENIDO DE CARBONO, MEDIDA EN ESCALA VICKERS.

(Tomado de Physical Metallurgy Principles, Robert E. Reed-Hill, pg. 726).

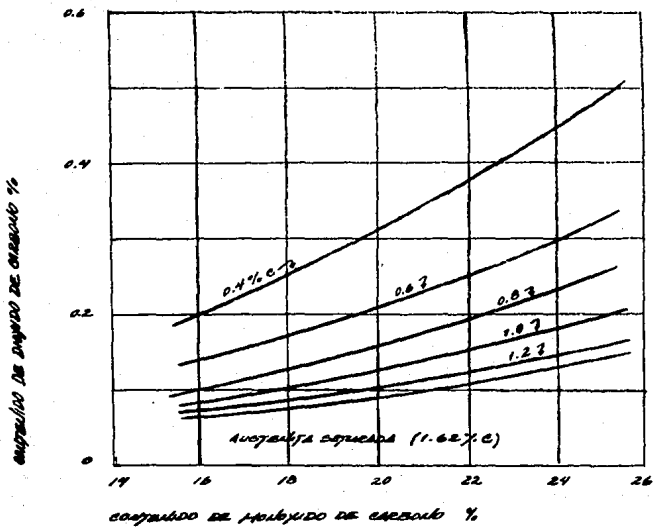


Fig. (4) PORCENTAJES DE NITRÓGENO DE CARBONO Y NITRÓGENO DE CARBONO CORRESPONDIENTES A VARIAS CONCENTRACIONES DE CARBONO PARA ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALIACION.

(Tomada de Principles of Heat treatment of Steel, George Krauss).

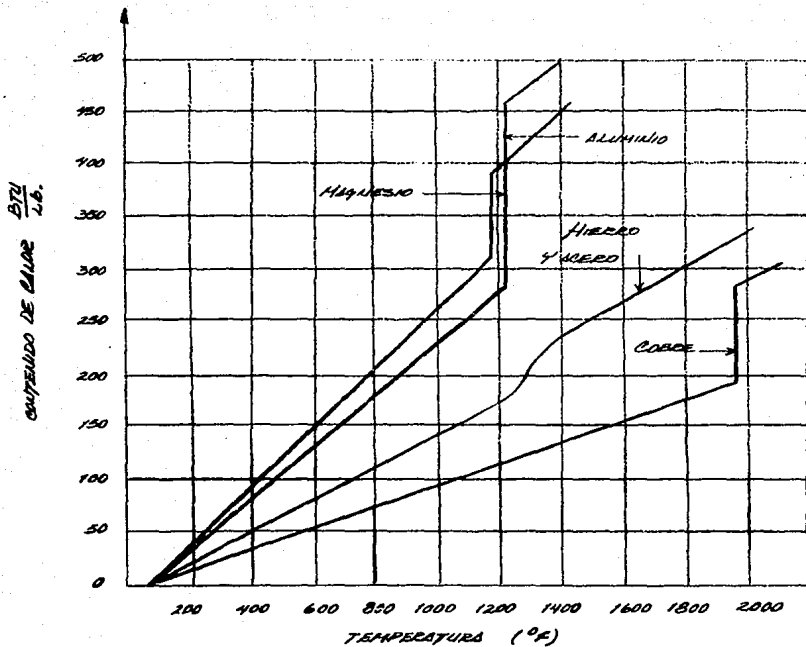


Fig. (5)

VARIACIÓN DEL CALOR ABSORBIDO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA VARIOS MATERIALES.

(Tomada de Industrial Heating August 1985)

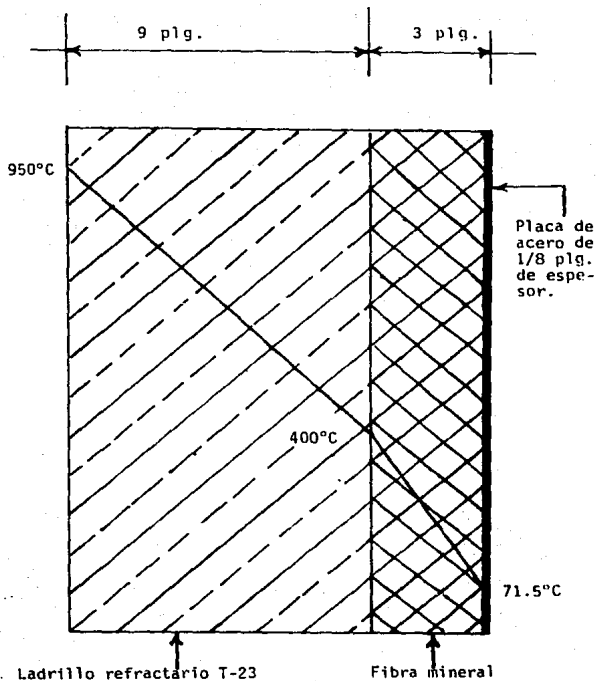


Figura (6). Perfil de temperaturas a través de las paredes del horno, así como los materiales que la forman y sus correspondientes espesores.

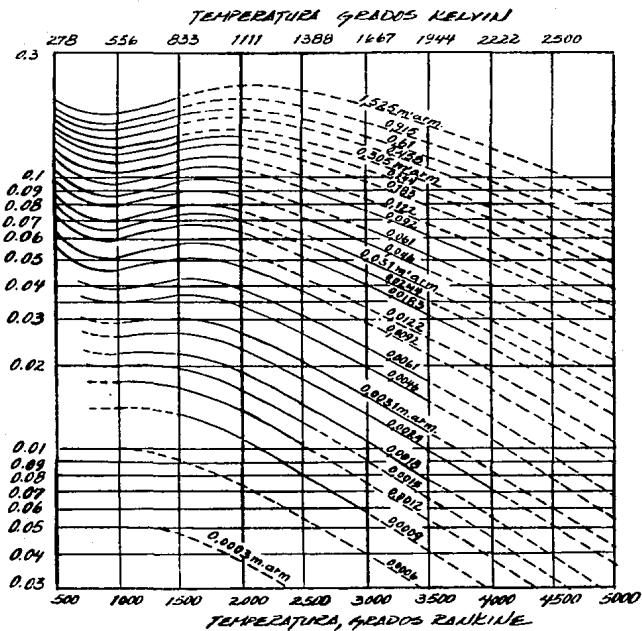


FIG. (7) EMISIVIDAD DEL BIÓXIDO DE CARBONO  
 $P_f = 1.0 \text{ A.T.M.}$

(Tomada de Heat Transmission Mc. Adams pg. 83).



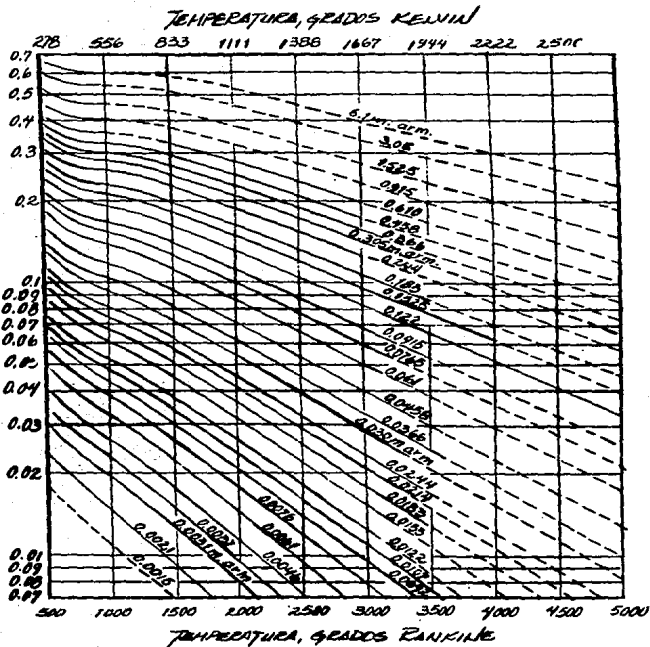


Fig. (8) Emisividad del vapor de agua

$P_T = 1.0 \text{ ATM.}$

$P_W = 0$

(Tomada de Heat Transmission, Mc. Adams pg. 85)

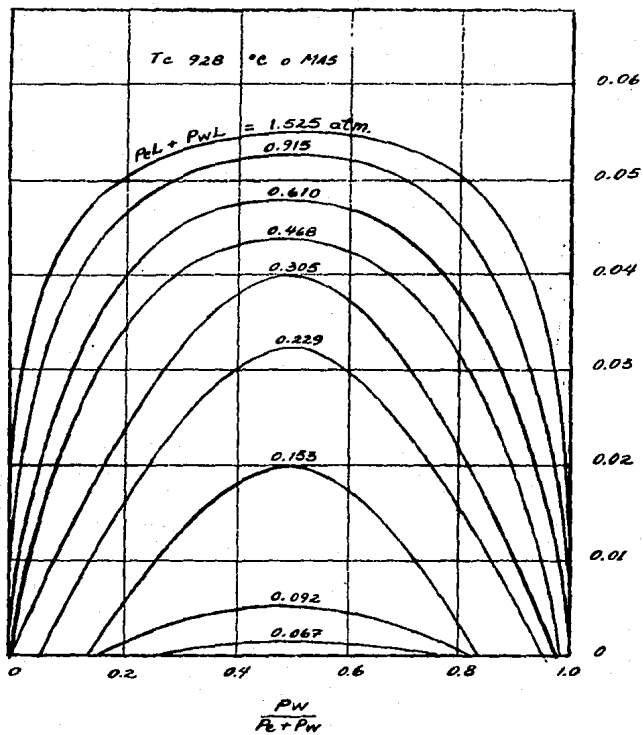


Fig. (9) CORRECIÓN DE LA EFICIENCIA DEL GAS CUANDO  $\text{CO}_2$  Y  $\text{H}_2\text{O}$  ESTÁN PRESENTES DEBIDO A LA SUPERPOSICIÓN DE LOS ESPECTROS DE IRBOS.

(Tomada de Heat Transmission Mc. Adams pg. 86).

## T A B L A   D E   V A L O R E S

PROFUNDIDAD (MM)	CONTENIDO DE CARBONO %	
0.15	0.71	
0.30	0.63	
0.45	0.55	
0.60	0.48	
0.75	0.42	
0.90	0.36	
1.05	0.32	
1.20	0.29	
1.35	0.26	
1.50	0.24	
1.65	0.23	
1.80	0.21	
1.95	0.20	

% CARBONO	DUREZA VICKERS	DUREZA ROCKWELL
0.80	940	68.00
0.71	910	67.00
0.63	890	66.00
0.55	840	65.00
0.48	800	64.00
0.42	770	62.90
0.36	730	61.30
0.32	700	60.00
0.29	660	58.50
0.26	620	56.30
0.24	590	54.70
0.23	560	53.30
0.21	540	52.00
0.20	510	50.20

Tabla (1) variación del contenido de carbono en función de la profundidad, así como la dureza en función del contenido de carbono.

COMPUESTO	$H_f^0$ (K cal/mol)	(g/cm <sup>3</sup> )	Cp (cal/g °C)
H <sub>2</sub> O(g)	- 57.7979		0.27
H <sub>2</sub> O(l)	- 68.3174	1.0	
CO(g)	- 26.4157	0.013	
CO <sub>2</sub> (g)	- 94.0518	0.0019	0.29
CH <sub>4</sub> (g)	- 17.889		
NH <sub>3</sub> (g)	- 11.04		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	- 20.236		

COMPUESTO	K (BTU/h-pie-°F)	(Lb/pie <sup>3</sup> )	Cp (BTU/h-pie-°F)
Acero al Carbono (menos del 1.0%)	26.5	486	0.11
Acero inoxidable (tipo 330)	8.0	490	0.11

Tabla (2) Propiedades Físicas de algunos compuestos  
(Tomada de Castellán, Físicoquímica y de Kreith Principles of Heat Transfer).

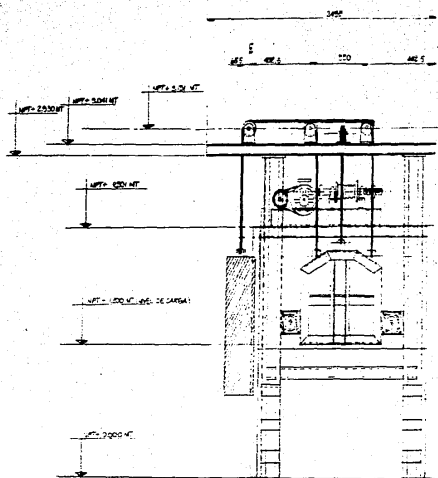
N.O.M.	NORMAS OFICIALES MEXICANAS
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS
SAE	SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
ASM	AMERICAN SOCIETY FOR METALS
AISI	AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE
AIME	AMERICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGIACAL ENGINEERS.

Tabla (3) Lista de abreviaturas

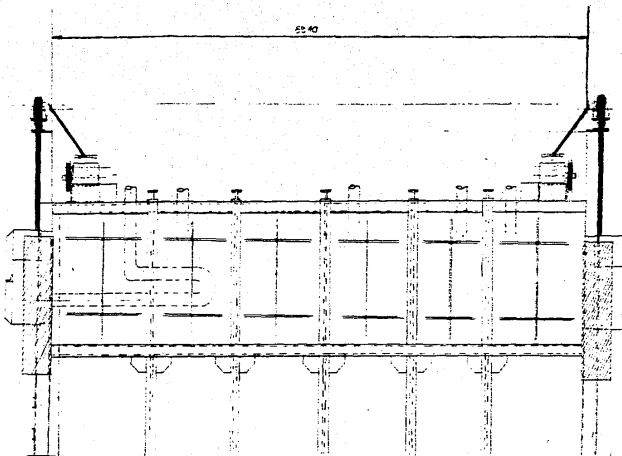
TEMPERATURA ( °F )	CUERPO NEGRO BTU/h ft <sup>2</sup>	TEMPERATURA ( °F )	CUERPO NEGRO BTU/h ft <sup>2</sup>
200	181	1200	17400
250	319	1250	19900
300	477	1300	22800
350	645	1350	26200
400	892	1400	30800
450	1170	1450	34100
500	1500	1500	38900
550	1890	1550	44000
600	2380	1600	45800
650	2940	1650	56400
700	3570	1700	63400
750	4280	1750	71100
800	5140	1800	79800
850	6090	1850	89200
900	7170	1900	99500
950	8580	1950	110000
1000	9750	2000	122000
1050	11300	2050	136000
1100	13000	2100	157000
1150	15000	2150	167000

Tabla (4) Pérdidas de cuerpo negro a diferentes temperaturas.

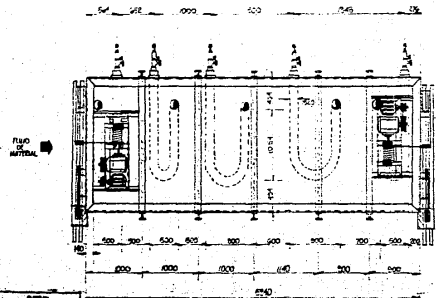




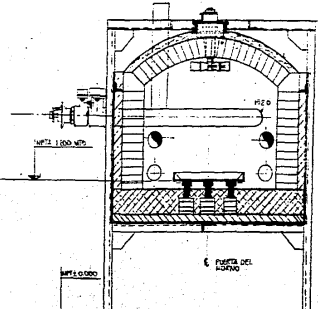
ELEVACION










VISTA LATERAL



PLANTA

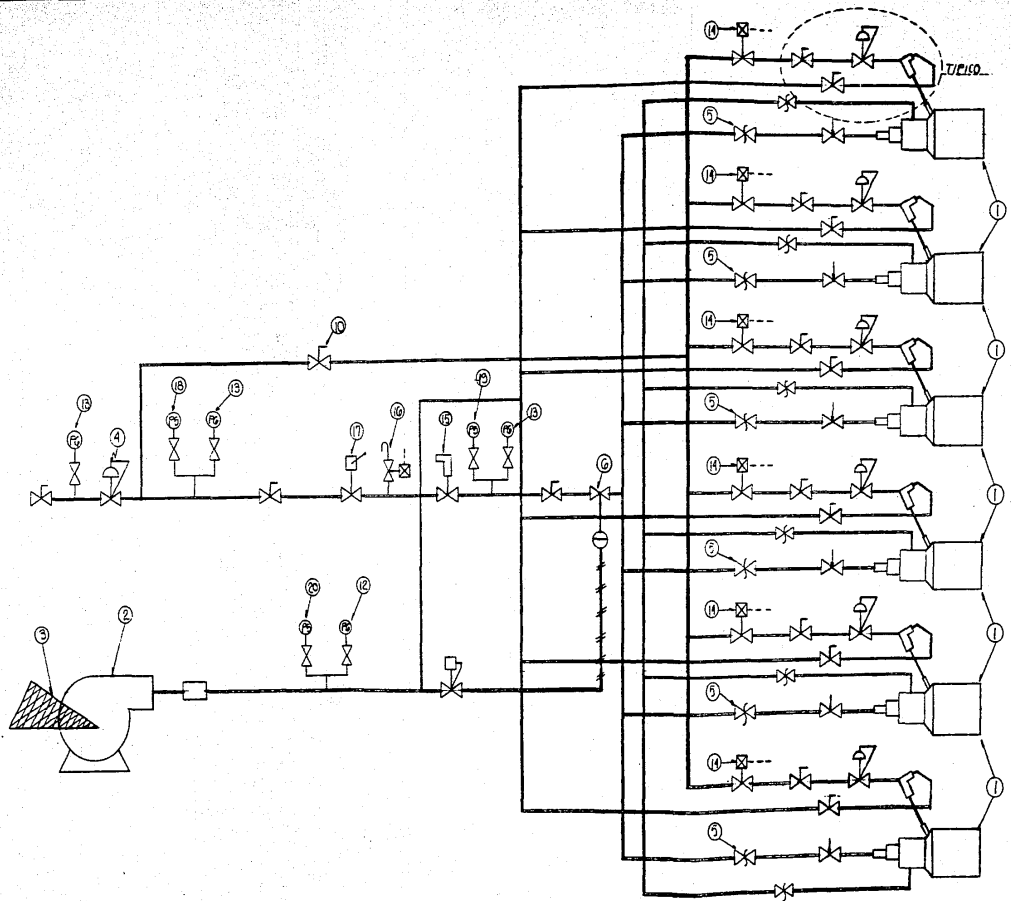


VISTA A-A

-  CONCRETO ARIANTE APALABRESI
-  CONCRETO REFRACTARIO PLACOST 51
-  LADRILLO REFRACTARIO 40x41
-  FOUVERO ARIANTE PLACOST LW-20
-  LADRILLO ARIANTE T-20
-  BIELLO DE S1C
-  LADRILLO ARIANTE P-18

PLANO GENERAL DEL HORNO TIPO RADIANTE





DESIGN.	PLANO No.		
REVISOR.			
APROBADO.	ESC.	ACOT.	FECHA.
07			

DIAGRAMA DE COMBUSTION