

06574
Ref. 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

ESTUDIO TERMODINAMICO DEL PROCESO
DE REFUSION DE CHATARRA DE ALUMINIO
EN HORNOS DE REVERBERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN METALURGIA
P R E S E N T A :
ALPHA MAMADOU OURY BAH



MEXICO, D F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----|
| I. | RESUMEN | i |
| II. | INTRODUCCION | 1 |
| III. | REVISION BIBLIOGRAFICA | 4 |
| IV. | DESCRIPCION DE LOS EXPERIMENTOS | 18 |
| V. | DESCRIPCION DE RESULTADOS | 23 |
| VI. | DISCUSION DE RESULTADOS | 32 |
| VII. | CONCLUSIONES | 39 |
| VIII. | APENDICES | 42 |
| IX. | BIBLIOGRAFIA | 113 |

R E S U M E N

Dado que el horno reverbero es un reactor químico y térmico en el que se realiza la refusión de aluminio es de esperarse que exista un - compromiso entre los potenciales energético y térmico que resultan de los gases de combustión.

Dentro de los problemas metalúrgicos más serios, por su implicación económica están las pérdidas cuantiosas de Al, las cuales se traducen en un incremento en el volúmen de escoria durante la refusión de chatarra de aluminio. De aquí que el estudio del proceso en este contexto sea mandatorio para llegar a reducir al mínimo estas pérdidas, sin que se sacrifique ni el tiempo ni el costo de refusión de estos materiales en el horno.

Para alcanzar este objetivo fué necesario caracterizar a los - gases pre y postcombustión y a los productos de reacción durante el procesamiento de la carga. Las técnicas analíticas a las que se recurrió fueron: Cromatografía de gases y de rayos X (difractometría y fluorescencia), absorción atómica y volumetría, respectivamente.

En virtud de que la determinación de la composición de los gases de combustión se efectúa a temperatura ambiente fué necesario regenerar las composiciones de éstas a la temperatura de operación del horno. - Para ello, fué necesario implementar un programa de cómputo en el que a - pequeños incrementos de temperatura, termodinámicamente se regenera la atmósfera a la temperatura de operación de los hornos industriales (800-900 °C). Con estos resultados, se generaron los diagramas de estabilidad -- (termodinámica) de fases, mediante los cuales se explica el porqué aún a pesar de controlar la relación aire-combustible, la oxidación del alumi - nio es inminente.

La presencia del AlN como se espera es consecuencia de la relación aire-combustible.

Por lo tanto se concluye que al refundir el aluminio éste se oxidará y que por lo tanto se deba cuidar más cercanamente la eficiencia de la combustión.

A B S T R A C T

Since the reverberatory furnace is considered a chemical and thermal reactor in which the melting of aluminium takes place, it is expected that there exist a compromise between the energy and thermal potentials typical of the combustion gases.

Due to their economical implications the loss of aluminium ranks amidst one of the most serious metallurgical problems, this clearly translates in an increased slag volume during scrap remelting. Hence, to study the processes involved is essential to reduce to a minimum such losses without undue waste of time of cost increases.

In order to fulfill this aim, it became necessary to characterize the gaseous atmospheres before and after combustion, and the reaction products during the process. The analytical techniques used were gas chromatography, X-ray spectrometry and diffraction, atomic absorption and wet chemical analysis.

As the combustion gases were analysed at room temperature, it was necessary to regenerate their compositions at the operation temperature. This meant to implement a computer program which would perform the appropriate thermodynamic calculations to recombine the atmosphere, applying small increases in temperatures, up to the industrial furnaces operating temperature range (800-900°C). With these results it was then possible to prepare the (thermodynamic) phase stability diagrams, which allow an understanding of the oxidation reaction of aluminium that occurs despite the fact that the fuel to air ratio is controlled.

As expected, the presence of the aluminium nitride, AlN, is a consequence of the said ratio.

Therefore, it is concluded that the metal will oxidize and that the combustion efficiency must be looked closely.

I N T R O D U C C I O N

La sustitución de lingotes de primera fusión por chatarra en las cargas de refusión de aluminio en hornos de reverbero causa pérdidas de aluminio, bastante considerables. En la Cía. ALMEXA por ejemplo, estas pérdidas de aluminio son de alrededor del 5% o más si es que se aumenta el porcentaje de chatarra en la carga.

Por otro lado, debido al decremento de las reservas de la bauxita con las explotaciones continuas de este mineral y al creciente desgaste (deterioro) de productos (materiales) existentes surge la necesidad de un reciclado (1).

Debido a lo anterior, surge la necesidad de realizar un estudio del proceso de refusión de aleaciones de aluminio en hornos de reverbero.

El propósito de este trabajo, es el de tratar de dilucidar los mecanismos de oxido-reducción del proceso de refusión de aluminio en hornos de reverbero, que permitan establecer las modificaciones que conduzcan a un mejor procesamiento de refusión de aleaciones de aluminio, y por ende a aumentar la eficiencia de combustión y al mismo tiempo a evitar la oxidación del baño metálico, para obtener resultados útiles desde un punto de vista industrial.

Un análisis del proceso de refusión de aluminio en hornos de reverbero muestra en ALMEXA que esas pérdidas son debidas principalmente a la naturaleza de la atmósfera del horno, el tipo de carga y las dimensiones del horno. Un estudio preliminar de la escoria muestra que sus principales com-

ponentes son alumina, aluminio metálico y nitruro de aluminio. Lo cual confirma las predicciones termodinámicas hechas solamente a partir del diagrama de Ellingham (2).

Entre los principales problemas de este proceso, se tienen pérdidas de aluminio en escoria, alto consumo de energía y baja eficiencia térmica del horno.

Los problemas mencionados se establecen a partir de un estudio termodinámico de la energía liberada por la combustión del gas natural.

Para la combustión, se emplearon mezclas de aire-gas natural cuyas relaciones variaron desde 8:1 hasta 12:1; la atmósfera resultante puede ser reductora u oxidante respectivamente. El uso de una relación baja de aire a combustible, conduce a un consumo elevado de este último, ya que no se liberaría la máxima energía que contiene, originando así un producto de menor calidad. Además, debido a que bajo ciertas condiciones de combustión, el carbono no quemado del combustible puede reaccionar con el metal formándose así el carburo de aluminio (3).

Esto contribuye a elevar el consumo del combustible, lo cual da lugar a una baja eficiencia de la combustión. Otro factor muy importante es cómo se presenta el aire. Si éste viene seco o si contiene cierta humedad. En este último caso esta humedad reaccionará con el metal para formar alúmina e hidrógeno que se disolverá en el aluminio líquido; ya que su solubilidad es elevada en este último a altas temperaturas.

Por otro lado, debido a la alta afinidad del aluminio por el oxígeno, las presiones parciales de CO e H₂ deben ser lo suficientemente grandes para favorecer la reducción de la alúmina en una atmósfera donde existen CO, CO₂, H₂ y H₂O.

REVISION BIBLIOGRAFICA

HORNOS DE REVERBERO (4,5):

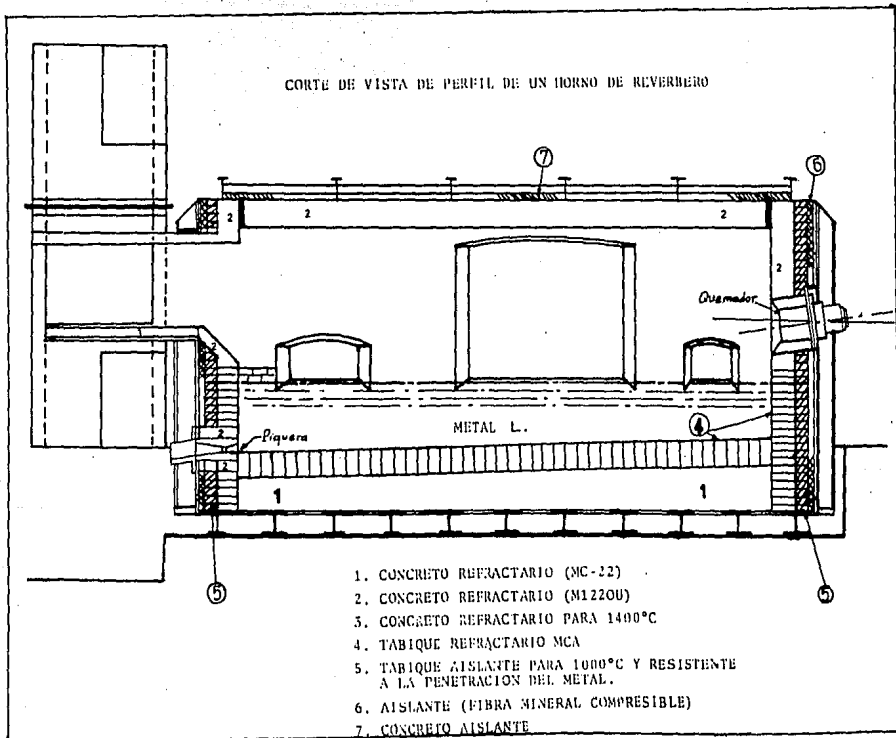
Estos hornos son del tipo de fuego directo, el cual proviene de la reacción combustible-aire. Estos pueden ser de dos tipos de diseño: de solera seca o mojada. En un horno de solera mojada, los productos de combustión están en contacto directo con la superficie del baño fundido, y la transferencia de calor es por una combinación de convección y radiación. En un horno de solera seca la carga del aluminio sólido está colocada en una solera inclinada encima del nivel del metal fundido de manera tal que la carga esté en contacto directo con los gases calientes. El calor es absorbido rápidamente por la carga sólida la cual funde y fluye por la pendiente de la solera.

Los hornos de solera seca pueden fundir más rápidamente que los de solera mojada, pero las pérdidas de metal por oxidación son más grandes en los primeros que en los últimos. Otra desventaja de fundir en un horno de solera seca es que debe conservarse el piso limpio lo cual hace que esto sea una tarea laboriosa. De otra manera, si las impurezas permanecen en la solera el producto tendrá impurezas a base de hierro.

De los dos tipos de hornos de reverbero, los hornos de piso mojado son los más comunmente usados. Este tipo de hornos es de dos diseños diferentes, uno es cargado directamente por dos paredes contiguas y el otro por medio de una plataforma de carga.

Los hornos de reverbero son usados generalmente para fundir grandes cantidades de aluminio para abastecer a los

CORTE DE VISTA DE PERFIL DE UN HORNO DE REVERBERO



hornos de retención, o son usados para refundir chatarra metálica, y pueden ser lo suficientemente grandes en forma tal que pueden llegar a contener hasta 90 toneladas de aleación de aluminio fundido. Los más grandes son diseñados desproporcionalmente más anchos y largos que los hornos pequeños. Esto se debe a que la profundidad del baño debe mantenerse a un máximo de 30 pulgadas, independientemente del tamaño del horno. La altura del techo arriba del metal fundido depende de la altura de la puerta de carga y del tipo de carga usada. La altura del techo depende también del factor de liberación de calor relativo al volumen del horno, como la energía de entrada. En general, los constructores de los hornos prefieren no exceder $30,000 \text{ BTU/pie}^3$ ($266978.88 \text{ Kcal/m}^3$) de espacio del baño metálico.

CALENTAMIENTO:

Los hornos de reverbero pueden ser calentados por gases o combustibles. Algunos quemadores pueden usar mezclas de gas y aceite. Esto dependerá de la disponibilidad y el costo del combustible. El tamaño y el número de quemadores para un horno son seleccionados de acuerdo a la velocidad de fusión que se requiera. Una eficiencia del combustible del orden de un 30% en la fundición de aluminio, es considerada buena.

Los quemadores pueden ser de tobera de mezcla o de tipo de premezclado. Ambos tipos se consideran satisfactorios en instalaciones específicas; aunque los quemadores con tobera de mezcla son los más usados comúnmente. En los hornos de reverbero las flamas no insiden directamente sobre la superficie del metal, ya que esto causaría turbulencia, oxi-

dación excesiva y captación de hidrógeno.

La mayoría de los hornos de reverbero utilizan el quemador con tobera de mezcla que lanzará una flama larga haciendo uso de "alimentación de paso doble". Esto comienza con una flama luminosa o semiluminosa, relativamente alta en la cámara de combustión que radía energía al refractario de las paredes y del techo. Como las paredes y el techo están incandescentes ellos radían el calor hacia el baño.

Por otra parte, por el campo de flujo de fluido en este tipo de hornos, el calor convectivo es transferido de los gases al baño. Esto provee una doble transferencia de calor; esto es radiación en el curso de la parte de salida y convección en el curso de regreso. La puerta de escape de un horno de reverbero tiene un área de sección transversal que proveerá una presión positiva en el horno durante la fusión.

CARGA:

El horno de solera mojada se carga colocando el material de carga (sólido o líquido) directamente en la cámara o en la pared. Este procedimiento minimiza la oxidación del material de carga. El metal fundido debe ser cargado completamente en un ducto de colada (canal refractario).

La eficiencia de fusión en un horno de solera mojada se incrementa al precalentar los lingotes y la chatarra pesada. Los materiales de carga pueden ser precalentados, al colocarse cerca de la base de la chimenea antes de que se carguen en el horno. Esta práctica no sólo incrementa la eficiencia del horno sin que exista un costo extra de combusti-

ble, sino también asegura que el material esté libre de humedad. En los hornos de solera seca la chatarra se carga en éstos al colocar el material sólido sobre la solera. La solera se inclina con un ángulo de 10 a 15°, en la cual el metal se funde. Los óxidos de hierro y los otros materiales no metálicos permanecen en la solera en forma tal que el aluminio fundido se desplaza hacia el baño.

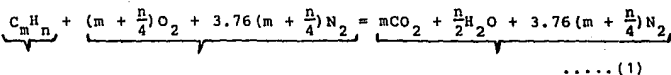
TRANSFERENCIA DE METAL:

El metal fundido se remueve del horno por medio de piqueras* directas o por inclinación torrencial. Los sifones, bombas y cucharones de mano también pueden ser usados.

Las piqueras son tapadas con conos refractarios falsos, de arcilla o mezcla de arcilla y arena. Algunos hornos tienen una piqueta en un pozo para remover el lodo. Además, puede usarse una piqueta superior para derramar el metal líquido. Algunos hornos usan bombas de aire para distribuir el metal en cantidades específicas.

LA COMBUSTION (6,7):

Los mecanismos de combustión se desarrollan en la fase gaseosa: la reacción química, en el caso donde el aire es utilizado como comburente, de la que se obtiene la energía térmica, es la siguiente:

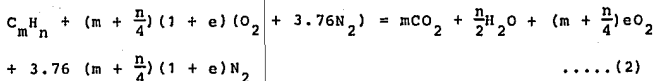


combustible

productos de combustión

* Piqueta, es un orificio que tiene un horno en la parte inferior de la pared para remover la escoria (Alto Horno) o para permitir la transferencia del metal líquido.

ó

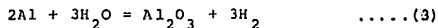


Donde "e" es la proporción de aire en exceso.

El factor más significativo que afecta la eficiencia del combustible es el exceso de aire en el horno. Considerando la química de la combustión en sus términos más simples, para la combustión completa con el aire, todo el carbono e hidrógeno del combustible forman CO_2 y vapor de agua (H_2O). El nitrógeno del aire no toma parte en la reacción de combustión de gases, pero sí absorbe una cantidad de energía producida por la combustión. Si los quemadores son alimentados con oxígeno comercialmente puro, la temperatura de flama llega a ser más alta ya que no existe nitrógeno presente que absorbe calor. De la ecuación 1, $(m + \frac{n}{4})$ moles de O_2 es la cantidad mínima teórica para la combustión completa de una mol de combustible $C_m H_n$; ésta es llamada la cantidad estequiométrica. Sin embargo, en un sistema de combustión es necesario suministrar más aire de la cantidad estequiométrica, ya que la mezcla no es perfecta. En la combustión de una mezcla gaseosa no existen problemas de mezclado, sin embargo para una mezcla de un combustóleo y gas se puede llegar a requerir un exceso de aire de un 20% mínimo. Así, mientras más fina es la atomización, más baja es la cantidad de aire en exceso que se requiere. El combustible quemado sin aire suficiente obviamente resulta en humo y escape de CO . El exceso de aire enfría la flama (8), de la misma manera que el nitrógeno. Esto conduce a obtener una velocidad de fusión más baja en el horno y consecuentemente eficiencias más bajas que en aquellas en las

que se usa sólo la cantidad estequiométrica de aire (9). --
Cualquier exceso de aire adicional, reduce aún más la eficiencia de la combustión (9-14) tales como aquéllos que se originan por errores del sistema de control de la relación aire-combustible en el quemador o por infiltración de aire atmosférico debido a errores del sistema de control de la presión del horno.

Si el nivel de aire en exceso en el horno se mantiene en un mínimo en forma tal que se obtenga una combustión completa, entonces el sistema de combustión no puede ser el causante de fusiones impropias. Un consumo específico de combustible alto con un exceso aceptable de aire (con las puertas cerradas) indicaría probablemente una técnica pobre de carga, esto trae consigo períodos largos con las puertas abiertas y consecuentes pérdidas de calor. Si el consumo específico de combustible para fundir es aceptable, pero la velocidad de fusión es inadecuada entonces la velocidad de carga también se reduce. Un exceso de combustible que produce CO conduce a tener una atmósfera reductora. Sin embargo, la oxidación de aluminio no puede ser controlada al usar este tipo de atmósferas ya que, incluso si todo el exceso de oxígeno es eliminado el vapor de agua presente en los productos de combustión reaccionará con el aluminio para formar alúmina, de acuerdo a la siguiente reacción (15):



La alúmina resultante es muy estable y ésta no es reducible ni por el monóxido de carbono ni por hidrógeno a las temperaturas de fusión en los procesos comunes de combustión en los que se requiere obtener la máxima cantidad de calor,

el propósito es quemar el combustible al máximo. El carbono del combustible debe quemarse para producir principalmente CO_2 , evitando la formación de CO que representa una cantidad menor de calor, (obtenido por la combustión parcial). Para obtener una combustión efectiva es necesario una relación correcta entre el comburente y el combustible, como se describe a continuación.

INFLUENCIA DE LA RELACION AIRE/GAS NATURAL:

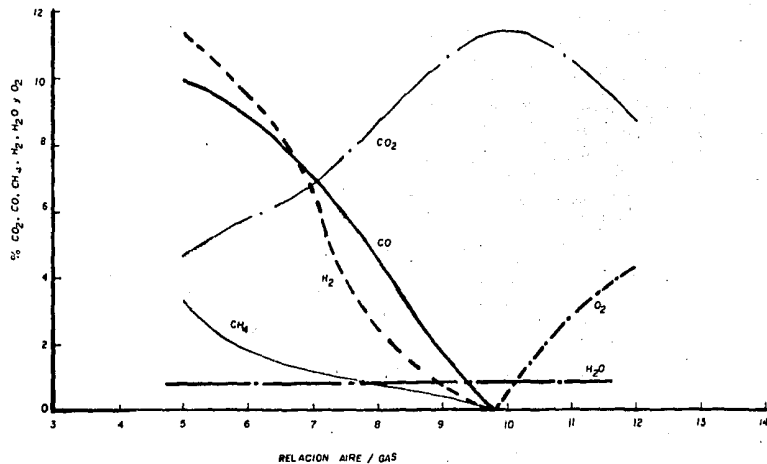
La fig. 1, muestra que conforme se aumenta la relación aire-gas natural, se reducen los porcentajes de los productos de combustión parcial y el CO_2 y H_2O se incrementan gradualmente. Al llegar a la relación 9.7:1 se obtienen como productos sólo CO_2 y H_2O . Pasando esta relación el CO_2 tiende a decrecer mientras que aparece gradualmente O_2 .

Este parámetro influye mucho sobre la temperatura de flama ya que a bajas relaciones de aire-combustible se origina una combustión parcial de los reactivos. De esto se espera producir menor cantidad de energía que la resultante de una relación estequiométrica.

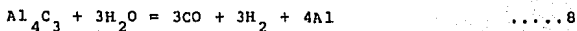
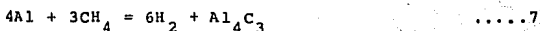
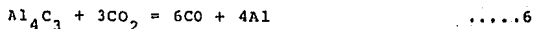
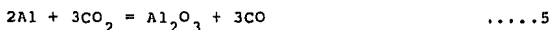
Si la relación aire-combustible es mayor que la estequiométrica el O_2 y el N_2 del aire en exceso aumentan las pérdidas de calor que arrastran los gases de combustión, (CO_2 , H_2O , O_2 y N_2). Así, los factores que influyen en la temperatura final del sistema son (16):

- La cantidad de calor generado por la combustión completa del combustible;
- La falta de adiabaticidad del horno; y
- el exceso de diluyentes en la atmósfera gaseosa.

Fig. 1.- EFECTO DE VARIACION EN LA RELACION AIRE-GAS EN LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION DE GAS NATURAL A TEMPERATURA AMBIENTE (18).



Los productos de combustión en un horno cerrado están en contacto directo con la superficie del metal y la atmósfera estará constituida de una mezcla de CO, CO₂, H₂, H₂O, O₂, N₂ y algunos hidrocarburos (en el gas natural principalmente aparece el CH₄). Esta mezcla de gas producida por la combustión, no está generalmente en equilibrio con el aluminio, lo cual implica que ocurren varias reacciones. Estas reacciones han sido descritas por Koebel (17) y Heyn (18), para el caso de los tratamientos térmicos de los aceros, las cuales al racionalizarse para el caso del aluminio son las siguientes:



Algunos investigadores reportan un estudio del proceso de combustión de gas natural y aceite en la fusión de aluminio (19), lo cual trata de los siguientes puntos: temperatura de flama, transferencia de calor de la flama, calor útil, factor de combustión y la influencia de la temperatura en la

capacidad de oxidación de aluminio líquido. Un breve resumen de este trabajo, se presenta a continuación.

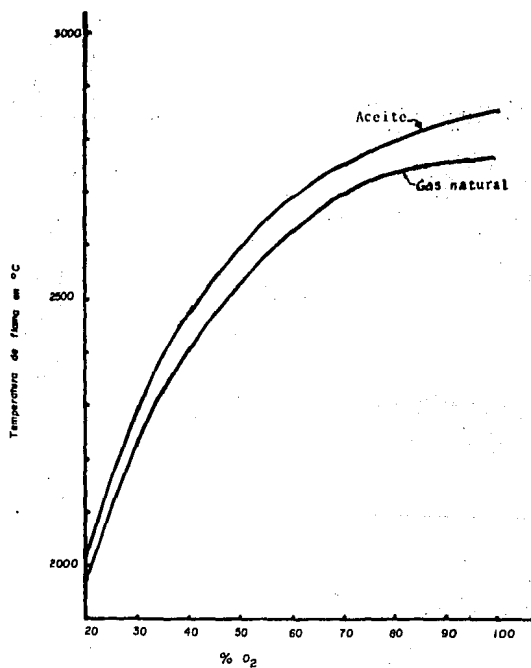
TEMPERATURA DE FLAMA:

La ganancia de energía resultante se muestra como un incremento de temperatura de flama. La Fig. 2, muestra el incremento de temperatura de flama teórica para la combustión estequiométrica en función del enriquecimiento de oxígeno en porcentaje del aire de combustión. Como se puede observar ambas curvas en la fig. 2, muestran el mismo incremento característico. Sin embargo, la flama producida por el aceite muestra mayor temperatura de flama. En la región de enriquecimiento inferior al 30% de oxígeno el incremento es lineal. Ya que el cambio en la temperatura es mayor en la región inferior de enriquecimiento, puede considerarse que el oxígeno tiene un efecto notable en el proceso de fusión en la región inferior del enriquecimiento porcentual. Se observa entonces la relación entre el incremento de la temperatura de la flama y el mejoramiento en el grado de eficiencia.

TRANSFERENCIA DE CALOR DE LA FLAMA:

La transferencia de calor de la flama a un material frío, tiene lugar a través de una combinación de radiación y convección. De acuerdo a las ecuaciones básicas de transferencia de calor, la transferencia de calor por convección se obtiene por la diferencia $T_f - T_e$ y la transferencia de calor por radiación se obtiene con $(T_f^4 - T_e^4)$. Donde T_f es la temperatura de flama y T_e es la temperatura del material de carga.

Fig. 2. LA TEMPERATURA DE FLAMA PARA LA COMBUSTION DE COMBUSTIBLE Y DE GAS NATURAL CON AIRE Y ENRIQUECIMIENTO CON OXIGENO. (19).



De lo anterior se infiere que un pequeño incremento de la temperatura de flama corresponde a una elevación considerable en la transferencia de calor por radiación; entre un 50% y 90% de la transferencia de calor de la flama se lleva a cabo por radiación.

Esta parte porcentual es dependiente principalmente de la forma del horno y de la relación entre el combustible y la carga. Si se supone que una determinada parte del calor total transferido se lleva a cabo por radiación y el resto por convección se puede entonces observar la influencia de la transferencia de calor al incrementar la temperatura de flama, la cual a la vez resulta del aumento del contenido de oxígeno en la mezcla gaseosa.

La fig. 3, muestra la influencia de O_2 en la capacidad de transferencia de calor por radiación. Por ejemplo, un horno que opera con un valor característico de 90% de transferencia de calor por radiación producirá un incremento en la transferencia de calor de 7.5% por cada unidad porcentual de oxígeno enriquecido. La pendiente positiva de la curva, muestra el % de radiación en el sistema y claramente señala el incremento en la transferencia de calor como un resultado de la adición de oxígeno.

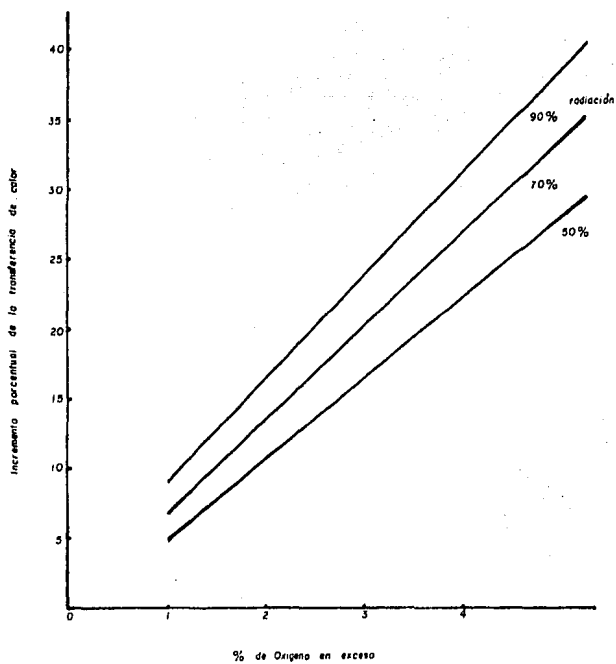
CALOR UTIL APROVECHABLE:

El calor útil de un combustible es el calor que resulta de las siguientes reacciones de oxidación:

Estado 1: (combustible + X aire + Y O_2)

Estado 2: Z (gas de combustión).

FIG. 5. INFLUENCIA DEL ENRIQUECIMIENTO CON OXIGENO EN LA TRANSFERENCIA DE 50, 70 Y 90% DE LA RADIACION (19).



El estado 1, se refiere a 298.16°K y a una atmósfera y el estado 2, se refiere a una temperatura determinada y a una atmósfera. X, Y, y Z son coeficientes estequiométricos para un metro cúbico normal de gas combustible.

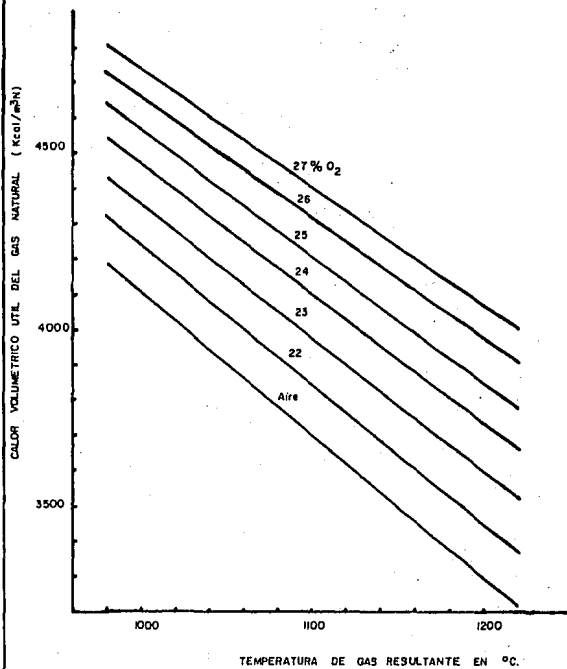
El calor útil está definido como el calor a disposición en un sistema térmico aislado (horno ideal) como producto de una combustión del combustible con oxígeno a una determinada concentración, donde el producto de combustión abandona el sistema con una temperatura determinada (temperatura de los gases de combustión).

De acuerdo a la fig. 4, el calor aprovechable de un gas disminuye con el incremento de la temperatura de los gases de combustión o de salida y se incrementa con el enriquecimiento con O_2 en el aire (pero únicamente para la misma temperatura de los gases de salida).

FACTOR DE COMBUSTION:

El factor de combustión determina la relación oxígeno/combustible en una mezcla de combustión como parte de las relaciones estequiométricas de oxígeno/combustible. El factor de combustión de una mezcla estequiométrica de oxígeno y combustible es igual a uno. Los factores de combustión menores de la unidad significan que una mezcla es pobre en oxígeno. Si estos son mayores que la unidad esto significará que se trata de una mezcla rica en oxígeno. En la práctica se trabaja con aire falso que entra en el horno (éste entra por infiltración) en la mayoría de los casos. El caso más crítico, es aquel en el que se trabaja con un exceso de aire para asegurar que existan condiciones en que se efectúe una combustión completa.

Fig. 4.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE GAS RESULTANTE
EN EL CALOR UTIL DEL GAS NATURAL. (19).



La fig. 5, A y B muestra el efecto del aire en exceso en el calor producido en el horno donde el gas combustible fué quemado en la relación estequiométrica con aire. Como se observa en estas curvas figura 5 B, el 10% de exceso de aire puede consumir del 7 al 11% de la energía que se genera, la cual corresponde al efecto del 3% de neutralización con oxígeno.

Si es que se requiere tener una combustión completa no es necesario trabajar con una cantidad sobre estequiométrica, al enriquecerse la mezcla gaseosa con oxígeno. La temperatura de flama más alta se tendrá en una mezcla pobre en la relación de oxígeno-combustible. La fig. 6, muestra que con un factor de combustión de .98 para una flama aire-gas natural y de .96 con 25% de enriquecimiento con oxígeno se alcanzará respectivamente la máxima temperatura de flama. Ambas curvas en esta figura muestran claramente la influencia negativa del aire en exceso que se introduce como aire falso en el horno. Este exceso de aire no sólo tiene una influencia negativa en el balance térmico sino también en la temperatura de flama. Por lo tanto, el proceso de enriquecimiento de oxígeno del aire, representa una mejora esencial frente a la práctica convencional ya que el factor de combustión puede mantenerse entre 0.94 y 1.

OBSERVACIONES ECONOMICAS:

Cuando el proceso de enriquecimiento de O_2 es establecido existe una ventaja económica.

En la fig. 7, ambas curvas dan la cantidad teórica de gas natural que puede ahorrarse y la cantidad de aluminio adi

Fig. 5a. INFLUENCIA DE EXCESO DE AIRE EN EL CALOR UTIL DEL GAS NATURAL (19).

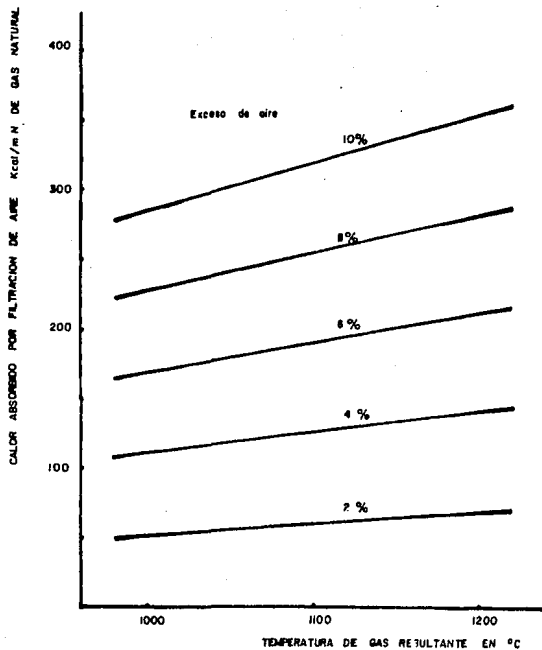


Fig. 5b. INFLUENCIA DE EXCESO DE AIRE EN EL CALOR UTIL DEL GAS NATURAL (191).

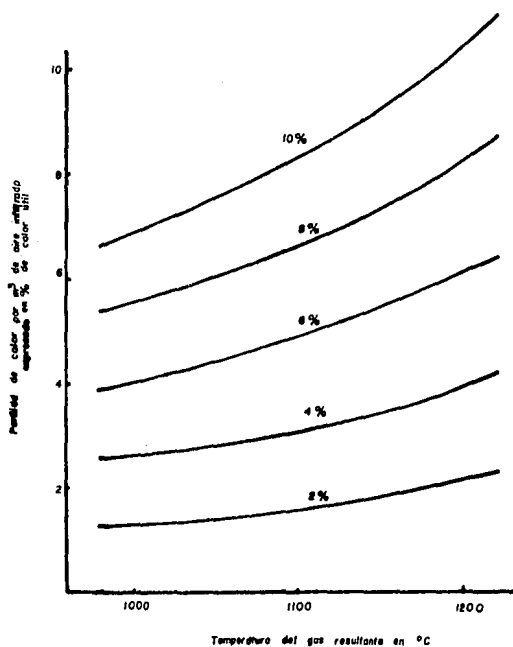
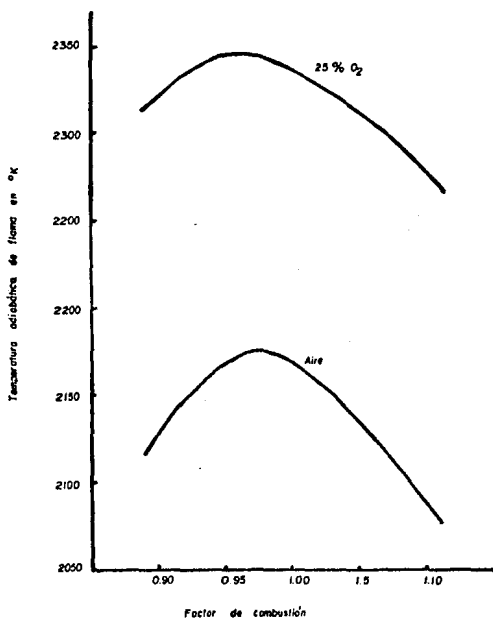


Fig. 6. INFLUENCIA DEL FACTOR DE COMBUSTION EN LA TEMPERATURA DE FLAMA (19).



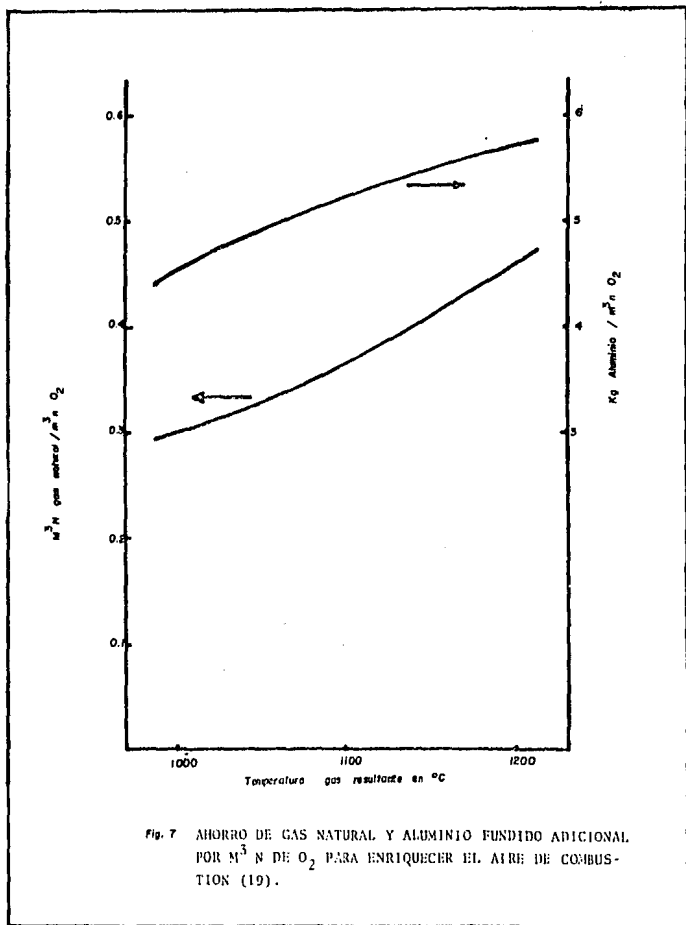


Fig. 7 AHORRO DE GAS NATURAL Y ALUMINIO FUNDIDO ADICIONAL POR M³ N DE O₂ PARA ENRIQUECER EL AIRE DE COMBUSTION (19).

cional que puede fundirse, ambas por metro cúbico normal de oxígeno.

Como estado de referencia se considera una combustión gas natural-aire para cualquier condición dada. Entre mayor sea la temperatura de los gases de combustión en plantas tradicionales, mayor será la economía al introducir oxígeno en lugar de aire.

LA OXIDACION (20):

Aunque en estado sólido (o a bajas temperaturas del punto de fusión), la oxidación del aluminio sea lenta y limitada a altas temperaturas la superficie expuesta del material a fundir juega un papel muy importante en la oxidación. Así para piezas tales como lingotes, la cantidad de alúmina formada permanece relativamente baja. Sin embargo, con piezas pequeñas o delgadas tales como virutas o papel "foil" la cantidad de alúmina formada es muy grande.

En estado líquido y a las temperaturas prácticas de colada (700 a 800°C), la formación de la película de alúmina sobre el baño metálico es instantánea. Luego de la formación de esta película, empieza a formarse una capa espumante (escoria) porosa que permite una difusión del oxígeno hacia el metal líquido. Es una de las razones por las que se debe evitar tiempos prolongados de fusión del aluminio a temperatura elevada. Los movimientos de la superficie de baño metálico, también causan una oxidación adicional de éste al romperse la capa de alúmina provocando así un contacto entre el metal líquido y los gases de combustión.

Por lo anterior, se recomienda el uso de fundentes de protección, espumantes o desoxidantes según sea el caso. Como fundentes de protección se usan por ejemplo la criolita o la carnalita. Estas sales impiden el contacto entre metal-gas de combustión o metal-aire reduciendo así las pérdidas por oxidación. Los espumantes son por ejemplo mezclas de NaCl y Na_3AlF_6 con proporciones diversas de Na_2SiF_6 , Na_2CO_3 y CaF_2 que permiten reducir la cantidad de metal que se encuentra en la escoria. Como fundentes-desoxidantes se tiene, por ejemplo, una mezcla de las siguientes sales con las siguientes proporciones NaCl 47.5%, KCl 47.5% y NaF 5%. Estas sales tienen doble función: química y física. Por una parte estas sales al fundirse reaccionan con algunos óxidos fusibles reduciendo a estos últimos, y por la otra, si estos óxidos (impurezas) son infusibles las sales se aglomeran alrededor de dichas partículas para arrastrarlas hacia la superficie del baño metálico.

DESCRIPCION DE LOS EXPERIMENTOS

El trabajo experimental se llevó a cabo en distintos laboratorios de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México y en el laboratorio de Control Técnico y de Calidad de ALMEXA.

1. Escoria.

- a) Preparación: Después de una serie de muestreos de escorias del proceso industrial se utilizó una trituradora de mandíbulas, modelo SBFC ASA, de 1730 RPM, para fragmentar la escoria por compresión entre las dos mandíbulas de acero al manganeso. Esta operación fué la primera etapa de preparación de escoria. Luego de la trituración, cada muestra se dividió por cuarteos a fin de obtener una más pequeña homogénea y más representativa. Luego de este paso, la muestra nueva se procesó en un molino de bolas para obtener un tamaño de partículas menor. El tiempo de molienda fue de quince minutos por muestra. El molino utilizado es del modelo KS-55-1407 y de serie 1021. Después de esta operación, la muestra se cribó. Este trabajo de cribado permitió obtener diferentes tamaños de partículas para cada muestra. El tiempo de cribado por muestra fue de veinte minutos.
- b) Análisis químico cualitativo: Para realizar el análisis de las escorias se utilizó el equipo de espectrometría y de difractometría de rayos "X" marca Philips de PW 1410 y 1050/25 respectivamente. Se utilizaron también en dicho laboratorio morteros de ágata para moler aún más las muestras de malla (-300) para reducir y homogeneizar las

partículas. Las muestras de escoria se montaron en ventanas de vidrio para realizar el análisis difractométrico.

En cuanto a la preparación de las muestras destinadas al análisis espectrométrico de rayos "x" (fluorescencia), fue necesario pesar dos muestras de 10 gramos por lote de malla (-300) y en cada muestra se le agregó 4 ml de aglutinante al moler y después se hizo la pastilla en un montador de presión de capacidad de 20 tons/cm². Tanto la cara superior como en la inferior se colocó un disco circular de papel maylar* antes de la fabricación de dicha pastilla para evitar su contaminación y al mismo se previera que los polvos al caer bloquearon el equipo. Una vez preparada la pastilla se procedió a su análisis montándola en una ventana de acero o de aluminio (ventana porta-muestra) para determinar los elementos ligeros o pesados de la muestra. De los difractogramas se identificaron las diferentes fases y elementos presentes (ver figs. 8 y 9) en la escoria.

c) Análisis químico cuantitativo de escorias: Este se llevó a cabo en ALMEXA y en otras empresas especializadas donde se determinaron por volumetría y absorción atómica los diferentes elementos presentes en la escoria. Así, por análisis químico por vía húmeda (volumetría) se determinaron las siguientes especies: Al_2O_3 , N_2 y F_2 . Los elementos metálicos (Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Ca, Si, Cu y K) se determinaron por absorción atómica.

El flúor se determinó en muestras de mallas (-200 y -250) y se utilizó el método Willard Winter (21). Este método y el de determinación de nitrógeno y de alúmina en la escoria se describen en el apéndice IV. Las soluciones obtenidas de la determinación de alúmina fueron enviadas al

* Papel maylar es un tipo de polímero que sirve de cubierta a la muestra que se está analizando en un espectrómetro de fluorescencia para evitar la contaminación de éste por una caída de los polvos de la muestra.

Fig. 8a. DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN LA ESCORIA

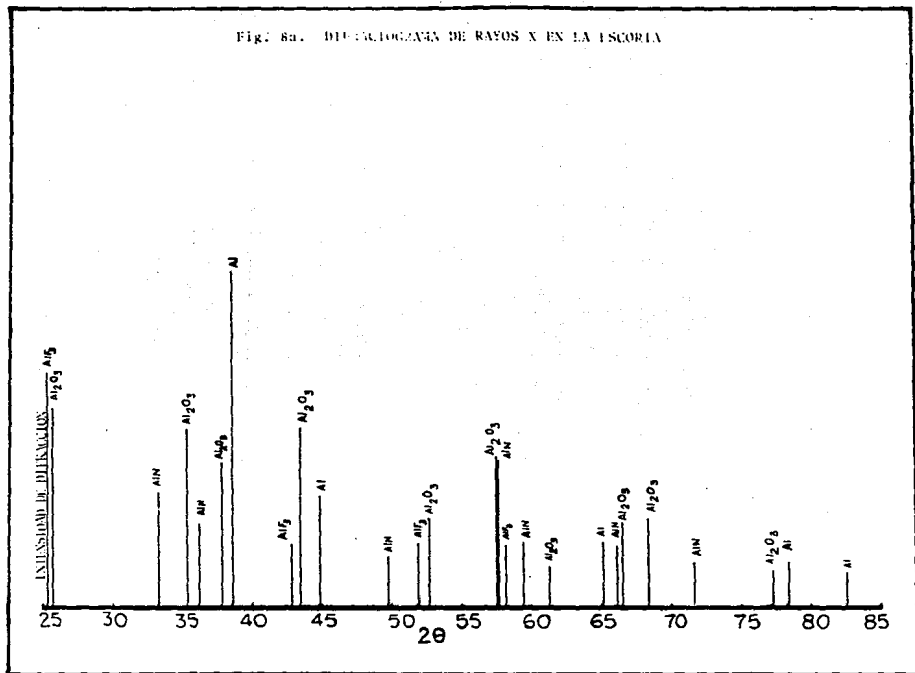


Fig. 86. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LA ESCORIA

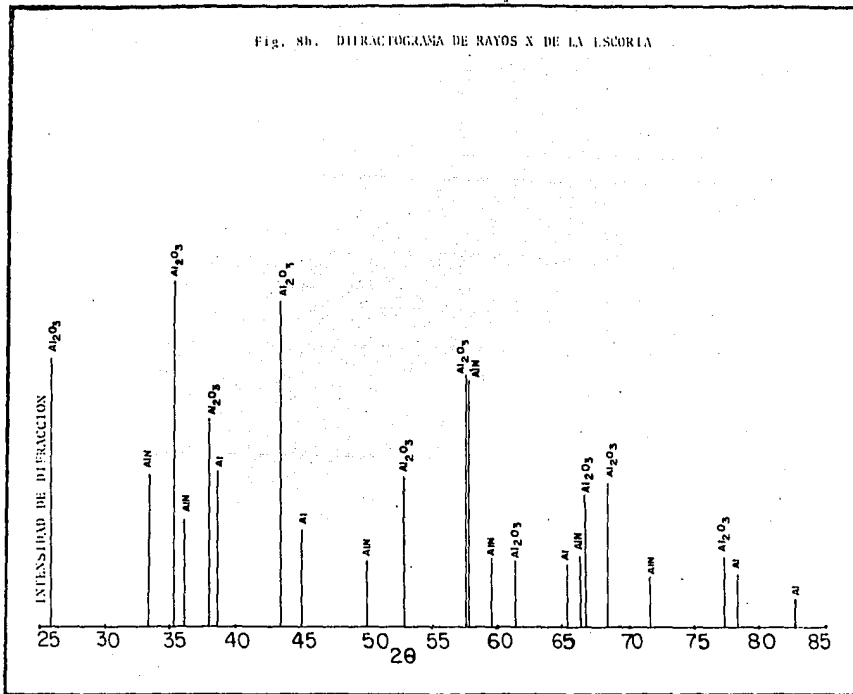
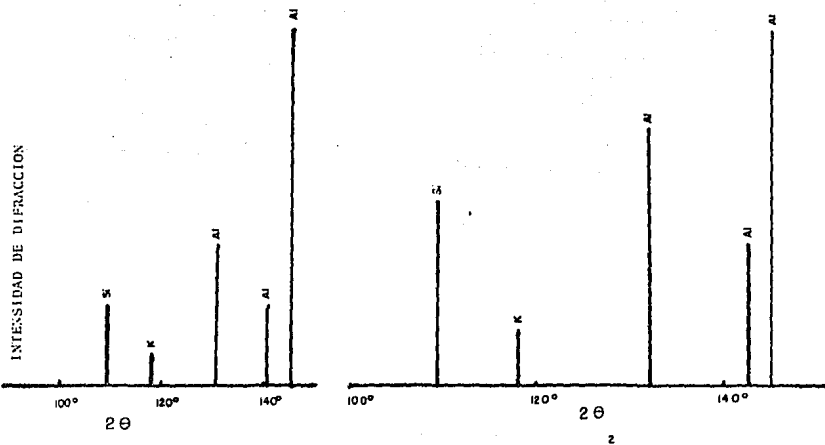


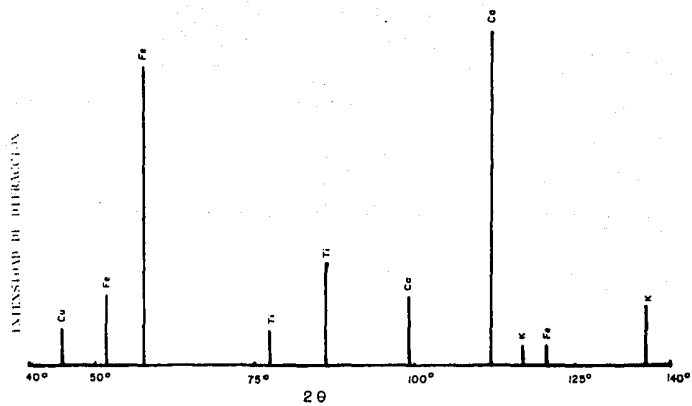
Fig. 9a. ESPECTROGRAMAS POR FLUORESCENCIA DE LA ESCORIA

ELEMENTOS LIGEROS



ELEMENTOS PESADOS

Fig. 96. ESPECTROGRAMA POR FLORESCENCIA DE LA ESCORIA



laboratorio de Perkin Elmer para su análisis. En dicho laboratorio se utilizó un equipo de espectrofotometría, modelo 460, marca Perkin Elmer.

2. Gases

- a) Gas natural: El análisis tanto del gas natural como los de la combustión se llevaron a cabo en el laboratorio de ALMEXA, utilizando un equipo de cromatografía de gases equipado con un integrador. El cromatógrafo de modelo sigma tres ($\sigma 3$) y el integrador ICI-100 (Perkin Elmer). Para conectar el cromatógrafo a la fuente de distribución del gas natural, se diseñó un dispositivo de la tubería de dicho gas. Así, por medio de una válvula se puede inyectar la muestra gaseosa en el cromatógrafo en donde ésta es arrastrada por un gas transportador, (He), hacia una columna selectiva para alcanzar el detector del cromatógrafo. Para realizar los análisis, se utilizó un detector de conductividad térmica. Antes del análisis se procedió a la preparación de las condiciones de trabajo de la columna en el horno; esto es, la determinación del flujo de gas de arrastre, programa de las temperaturas del inyector, columna y detector, la velocidad de avance de la carta (papel cromatógrama) de atenuación. Por medio de los estándares gaseosos se determinaron los diferentes gases; inyectando éstos en las mismas condiciones de análisis. Un análisis del gas natural por cromatografía típico se muestra en el cromatógrama (Fig. 10).
- b) Gases de combustión: Se toma la muestra por medio de una lanza (tubería) conectada a una manguera, la cual a su vez está conectada a una "bala" de vidrio por un extremo

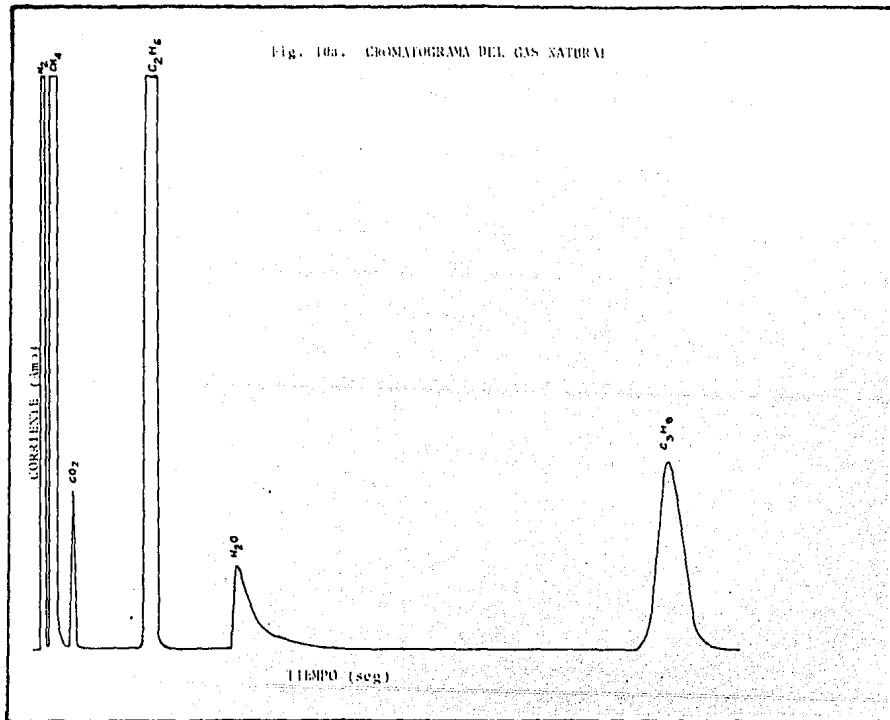
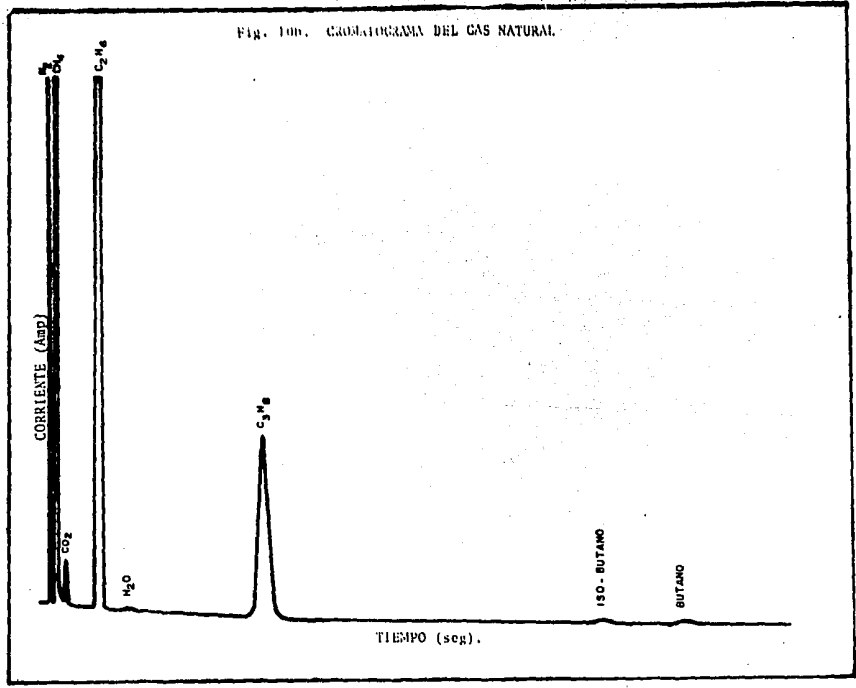


Fig. 100. CROMATOCAMA DEL GAS NATURAL.

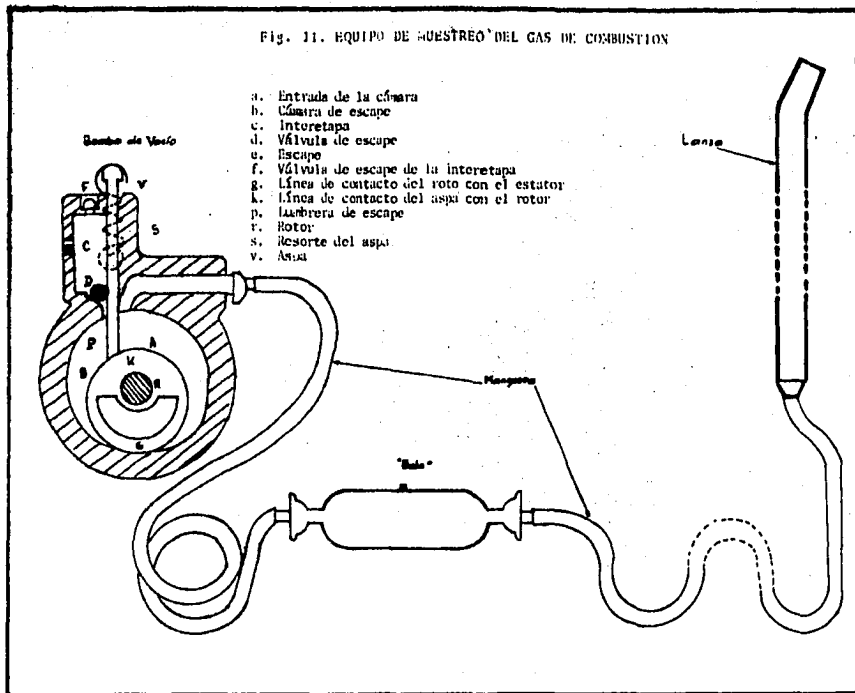


y por el otro extremo otra manguera que va unida a una bomba de vacío (CENCO PRESSOVAC serie 44510 con un motor, modelo 3J2386x5 de General Electric, cuyas características son FR 36, tipo KP $\frac{1}{4}$, PH 1 y RPM 1425). Las válvulas de paso de la "bala" se abren para que al introducir la lanza en el horno y conectando la bomba de vacío a la línea eléctrica, se llene la "bala" de muestreo. Después de quince minutos de operación se cierra primero la válvula de paso que está por el lado de la bomba y luego la del lado de la lanza. Este dispositivo se muestra en la Fig. 11. Las diferentes muestras de gas de combustión son llevadas a un horno de mufla donde están calentadas a 100°C. Por medio de una jeringa se muestrea el gas contenido en la "bala" para inyectarlo después y realizar el análisis cromatográfico. Aquí, se utilizaron los estándares gaseosos CO₂ e H₂ para determinar los picos de dichas substancias. En base a los resultados obtenidos en diferentes temperaturas de la atmósfera del horno se detectó la existencia de dos tipos de atmósferas (oxidante y reductora), como se ve en las fig. 12 y 13.

3. Experimentación y Técnicas de Análisis.

Los experimentos llevados a cabo fueron para determinar la influencia de la relación aire-combustible, el tiempo de exposición de la escoria en la variación de las relaciones aire-combustible (8:1 a 12:1), la variación de tiempo de exposición de la escoria a la atmósfera del horno (2.50 - 9.25 horas). Durante estos experimentos se efectuaron tomas de temperatura tanto del baño metálico, de la escoria y de la atmósfera del horno (750 - 1200°C). Cabe señalar que los rangos de variación de las relaciones aire-combustible fueron limita

Fig. 11. EQUIPO DE MUESTREO DEL GAS DE COMBUSTION



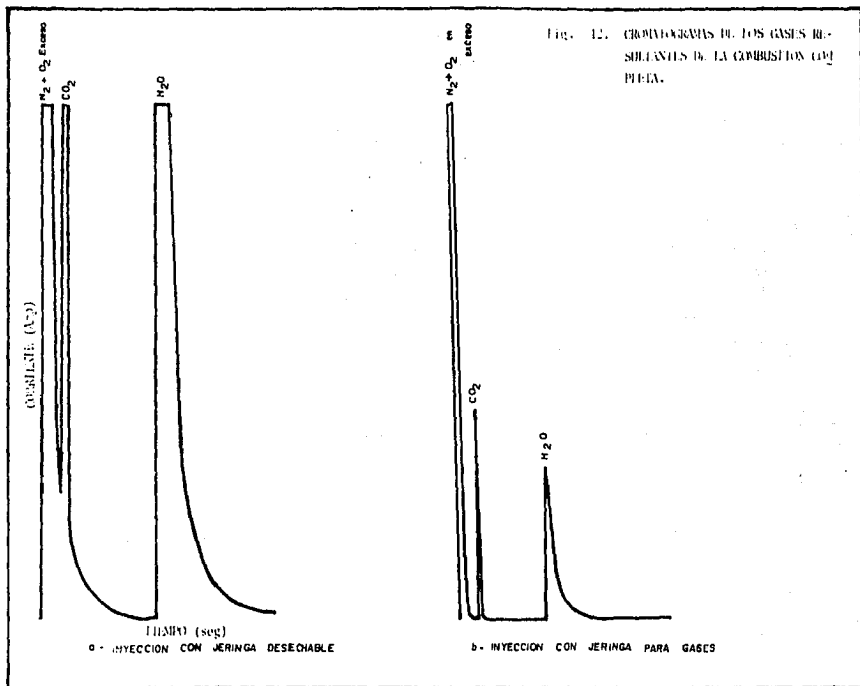
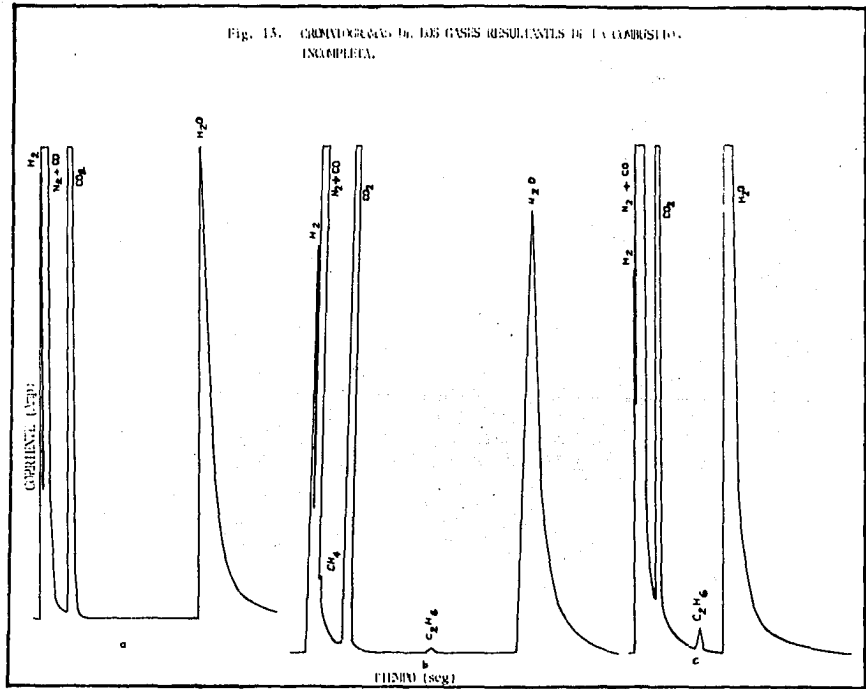


Fig. 15. CROMATOGRAFIA DE LOS GASES RESULTANTES DE LA COMBUSTION INCOMPLETA.



dos, para conservar la productividad de la planta.

Los análisis llevados a cabo fueron para determinar la composición del gas natural y de los gases de combustión por un lado, y la composición de la escoria por el otro. Los análisis por difracción de rayos "X" y por fluorescencia permitieron determinar respectivamente las diferentes fases y elementos presentes en la escoria de manera cualitativa. Posteriormente, se hicieron análisis químicos (por volumetría) a las muestras de la escoria para la determinación cuantitativa de Al_2O_3 , N_2 y F_2 . La determinación de los elementos restantes (metálicos) se realizó mediante la técnica de absorción atómica. El análisis de los gases tanto del gas natural como de los gases de combustión se hizo por cromatografía.

DESCRIPCION DE RESULTADOS

1. Gas natural:

La tabla I, muestra el análisis químico porcentual en peso de diversas muestras del gas natural que se utiliza como combustible en el proceso de refusión de chatarra de aluminio en ALMEXA. En esta tabla se observa que la composición del gas es casi constante.

Como cada muestra de gas que se analizó pasó directamente de la tubería de gas al cromatógrafo, mediante una válvula de paso. Los cambios de composición deberán ser atribuidos a la técnica de análisis y/o a variaciones en el suministro de gas. La tabla II, muestra la composición promedio en peso del gas natural. Estos análisis se realizaron por cromatografía de gases. La tabla III, muestra la composición promedio en volumen de dicho gas. Esta se obtuvo de la tabla II, al transformar los resultados a composición promedio en volumen. La aproximación que se hizo, fué considerar a éstos como gases ideales. Esto se realizó para convertir ésta en una composición atómica promedio, la cual sería útil para construir un diagrama ternario, (C-H-O). La tabla IV, muestra la composición en porcentaje atómico promedio, la cual se usó para representar el gas combustible en dicho diagrama, (fig. 16). En la fig. 10, se muestran dos cromatogramas (10-a y 10-b).

En el cromatograma 10-a, aunque se logra definir bien el pico de la humedad, su porcentaje es despreciable por ser muy pequeño teniendo en cuenta su factor de peso. Este pico pudo definirse entre otros por el gran volumen de la muestra. En la fig. 10-b, tanto el agua como el iso-butano y el butano no tienen picos bien definidos. Sin embargo, el N_2 , CH_4 , CO_2 ,

C_2H_6 y C_3H_8 se encuentran cuantificables en ambos cromatogramas. La colocación del gas combustible usado en la fig. 16, muestra el por qué se considera al gas natural como metano casi puro.

2. Gases de combustión:

El análisis por cromatografía de gases, mostró que durante la fusión de la carga de chatarra de aluminio en hornos de reverbero existen dos períodos de combustión. Uno de combustión completa durante el cual todo el combustible es quemado y transformado en CO_2 y H_2O más cierto exceso de aire y nitrógeno. El otro de combustión incompleta durante el cual el combustible es quemado parcialmente y con ello existen H_2 , CO y ciertos hidrocarburos de bajo peso molecular tales como el CH_4 y el C_2H_6 .

a) Gases resultantes de la combustión completa.

La tabla V, muestra los resultados en por ciento en peso de los gases de combustión completa. Comparando estos resultados cromatogramas de la fig. 12, se observa que no se encuentra definido el pico de oxígeno en los cromatogramas. Esto es debido a que al usar una columna porapak Q* no se pueden separar el oxígeno y el nitrógeno (22). Sin embargo, los otros gases están bien definidos. Para encontrar el porcentaje de oxígeno fue necesario analizar las mismas muestras a través de una columna "sieve" con la que sí se puede separar el nitrógeno y el oxígeno. En esta tabla se observa que la composición del gas resultante es algo variada; esta variación podría atribuirse a tres factores:

- la relación de aire a combustible
- la técnica de muestreo a partir del horno
- el equipo de inyección.

* La columna Porapak está empacada con polímeros porosos de tipo poliaromático (Etivinilbenzeno). Estos tienen una área de superficie de 100-700 m^2/g .

La relación de aire a combustible se cree sea el factor más importante que influye en los resultados; ya que al quererse aumentar la productividad, los operadores manejan altas relaciones aire-gas que llegan a ser de hasta 12:1.

Dado que es muy probable que se infiltre aire por la puerta en el momento de realizar el muestreo, se espera que la muestra gaseosa sea diluída con el aire infiltrado.

Respecto al equipo de inyección, aunque se hayan tomado las precauciones al extraer las muestras, podría suceder que el aire que se encuentra en la aguja de la jeringa, también altere este análisis.

La tabla VI, muestra la composición porcentual en volumen de los resultados que se encuentran en la tabla V. Estos a su vez fueron convertidos en composición atómica (tabla VII) para graficarse como se muestra en la fig. 16. Estos resultados muestran que durante la combustión completa se está trabajando con un exceso de aire.

La tabla VIII, representa la composición atómica promedio de los gases resultantes de la combustión completa. Esta sirvió de base para realizar los programas de computación y así encontrar las condiciones a las cuales está expuesta la carga durante la fusión. Los resultados obtenidos de los dos programas y graficados en el diagrama de predominancia en la fig. 17 demuestran que no importa el camino o método; los resultados son virtualmente los mismos. La pequeña diferencia que se observa, se debe a errores de cálculo.

** La columna "Molecular Sieve" esta emracada con zeolitas sintóticas (silicatos de sodio o de calcio-aluminio). Estos tienen una red uni forme₂ de cavidades y una gran frea de superficie especifica de 700-800 m²/g.

b) Gases resultantes de la combustión incompleta.

La tabla IX, muestra los resultados en la composición porcentual en peso de diversas muestras obtenidos del análisis de los gases resultantes de la combustión incompleta. Al igual que en el caso anterior, se nota que la composición de las muestras esta también variada. Esto puede ser debido a las mismas razones o factores ya mencionados en el caso anterior. Aquí también se puede notar en que ninguno de los tres cromatogramas de la fig. 13, se detecta el pico del CO. Esto se debe, como ya se explicó previamente, a que no se puede detectar o separar oxígeno o monóxido de carbono de nitrógeno utilizando una columna porapak Q. Así que para detectar el CO fue necesario usar una columna sieve.

Esta composición, tabla IX, fue convertida en otra expresada en volumen como se muestra en la tabla X. Esta a su vez fue transformada a una composición en por ciento atómico, (tabla XI) para que se representara gráficamente en un diagrama ternario C-H-O, (fig. 16). La tabla XII, muestra la composición atómica promedio de los gases resultantes de la combustión incompleta. Esta composición también sirvió de base, al igual que la de combustión completa, para realizar los programas ya mencionados.

Cabe notar que las composiciones atómicas promedio de los gases resultantes tanto de la combustión completa como de la incompleta están representadas por una cruz y por un triángulo respectivamente en la fig. 16.

3. Escoria:

Los análisis obtenidos por fluorescencia y difracción

de rayos "x" (figs. 8 y 9) y los obtenidos por absorción atómica y volumetría (tabla XIII) de la escoria, muestran cierta concordancia. Los compuestos principales de la escoria fueron la alúmina, el aluminio metálico y el nitruro de aluminio.

La gran cantidad de aluminio metálico en la escoria puede atribuirse a un arrastre mecánico del metal fundido junto con la escoria, ya que los cucharones usados no tenían agujeros para permitir el escurrimiento del metal líquido. También, se debe a una falta de uso de fundentes espumantes que permitan una buena separación entre el aluminio líquido y la escoria. Si se considera que la escoria no contiene aluminio metálico, ésta tendría la siguiente composición: Al_2O_3 84%, AlN 10.5% y FeO 2%.

La tabla XIII, muestra una composición muy variable de la escoria. Esta puede atribuirse a una fuente muy variada de la chatarra, aunque ésta tenga la misma composición nominal. También, se puede notar que esta composición no es función del tiempo de exposición de la escoria. Esto hace suponer que la composición de la escoria con respecto al tiempo tiene forma de hipérbola para el caso de Al_2O_3 y que ésta se localiza casi a la zona asintótica. Por ello no se nota una variación de Al_2O_3 como función del tiempo. También cabe notar aquí que a mayor tamaño de partícula mayor es la cantidad de alúmina.

La fig. 8, muestra dos difractogramas de la escoria muy similares. La única excepción es aquella encontrada en la fig. 8-a en la cual existe AlF_3 . Este fluoruro se presenta debido a que el fundente aún no se reducía en el momento

del muestreo, ya que este fundente se añade casi al tiempo de transferencia de la carga.

En la fig. 9, se muestran los análisis de fluorescencia de la escoria en donde se indican los elementos ligeros y pesados, respectivamente (figs. 9-a y 9-b). Los elementos cu y número atómico $Z \leq 19$ son considerados como ligeros, mientras que los que tienen el $Z > 19$ son los pesados.

4. Programas.

Los resultados obtenidos del programa I-A (tabla XXI) muestran que al fijar las temperaturas de la atmósfera a (800, 850 y 900°C) e ir variando la relación O/H (aire-gas natural) respectivamente se observa que a mayores valores de la relación O/H, se obtienen un decremento en valores de H_2 y CH_4 y un incremento en valores de CO y CO_2 . Mientras que el H_2O su valor aumenta conforme se incrementa la relación O/H hasta alcanzar un máximo (alrededor de O/H 8.25) y luego decrece. Se observa sin embargo, decrementos en CO y CO_2 para el valor de 9.5 de O/H (en las 3 temperaturas) y un incremento en H_2 (800 y 850°C).

Los resultados obtenidos del programa I-B (tabla XXII), muestran que teniendo fijas las relaciones O/H (0.3264462 y 1.0151515) a mayor temperatura se incrementan los valores de H_2 y CO. Para el valor de O/H (0.3264462) el CO se incrementa hasta una temperatura de 1250°K y luego decrece. Mientras que los valores de H_2O y CO_2 decrecen con el ascenso de la temperatura. Cuanto al comportamiento del CH_4 , éste aumenta conforme se incrementa la temperatura hasta ($T = 650^\circ K$); luego decrece a medida que asciende la temperatura. Estos resulta-

dos concuerdan con otros ya reportados (23).

Los resultados del segundo método, programa II (tablas XXIII y XXIV), confirman los resultados del programa I-B con la única modificación en el comportamiento del CH_4 , ya que este último programa muestra que el comportamiento del CH_4 es similar al de CO_2 y H_2O .

En el método I, se partió de un balance de material, de la regla de las fases y de las reacciones para obtener la ecuación de 4° grado, cuya raíz determinó la presión del hidrógeno en diferentes temperaturas. Por medio de la regla de la palanca se pudo determinar las relaciones de O/H y las constantes α y β . El método II, parte de la ecuación de Boudourd transformando a ésta en una algebraica de 2° grado y considerar la interconexión de las 4 ecuaciones químicas mencionadas previamente.

Ambos programas, dieron resultados de mismo orden de magnitud.

5. Influencia de la temperatura en el baño de aluminio:

La oxidación de aluminio fundido es un factor muy importante en todas las plantas fundidoras de aluminio. La temperatura juega un gran papel en la velocidad de fusión y consecuentemente en la oxidación del aluminio. La fig. 15 (19), muestra la relación entre la temperatura de aluminio y su velocidad de oxidación. Como se observa en esta figura la velocidad de oxidación del aluminio fundido permanece casi constante desde el punto de fusión 660°C hasta 770°C . Arriba de esta temperatura la velocidad de oxidación aumenta drásticamente. Contra todo lo esperado, la falta de oxígeno libre

Fig. 14. INFLUENCIA DE ESPESOR DE CHAFARRA EN LA OXIDACION DE ALUMINIO.

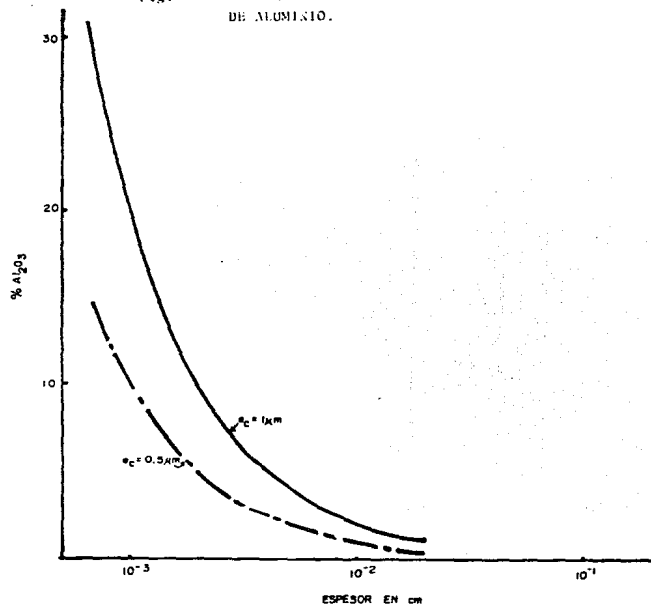
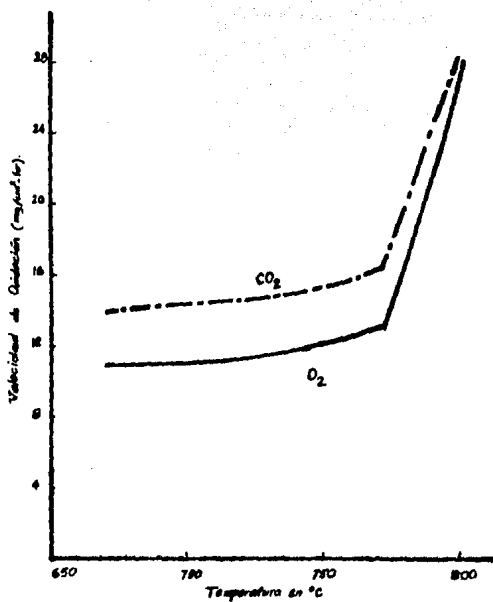


Fig. 15. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA OXIDACION DEL ALUMINIO LIQUIDO (19).



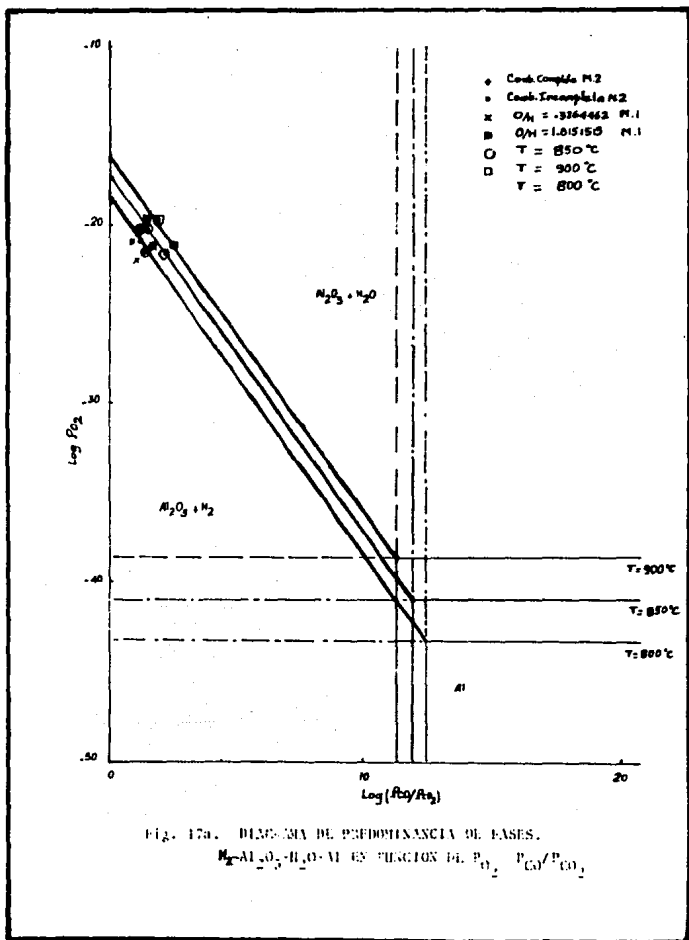
en la atmósfera del horno no es suficiente para evitar el proceso de oxidación. La oxidación por medio de dióxido de carbono (CO_2), tiene la misma influencia, ya que el CO_2 , que aparece en la combustión (ya sea el de un combustóleo o del gas natural) es inevitable; la temperatura es el único factor de control para la oxidación.

Al incrementar la temperatura de flama en forma tal que la transferencia de calor de la flama al material sobrepase la capacidad calórica de la carga, aparecerá en la superficie de ésta un sobre-calentamiento que conduce a una fuerte oxidación.

6. Influencia del espesor de la chatarra:

La fig. 14, muestra que el porcentaje de óxido de aluminio acumulado en la escoria respecto al de la carga es sumamente elevado a medida que decrece el espesor de la chatarra. Esto origina la necesidad de hacer un buen cálculo para optimizar la producción por carga. Otro factor muy importante es el cómo llevar a cabo la carga para disminuir la cantidad de escoria que se forma. Por ello es necesario cargar primero la chatarra delgada y luego encima la gruesa para evitar así el contacto directo de la primera con los gases calientes o después de la fusión de la chatarra gruesa, cargar la delgada que podría fundirse sin que se forme una capa de alúmina importante, ya que el tiempo de exposición a la atmósfera sería corto. Las curvas inferior y superior de esta figura, representan respectivamente los porcentajes mínimo y máximo de alúmina formada a altas temperaturas. Se podría entender así como altas temperaturas, las cercanas a 660°C . Esto considera sólo el efecto del espesor de la chatarra sin mención de la

oxidación por turbulencia del baño metálico o por contacto entre éste y los gases calientes por falta de uso de fundentes de protección. La tabla XIV, muestra tanto en combustión in completa como en la completa las temperaturas de la atmósfera son muy elevadas.



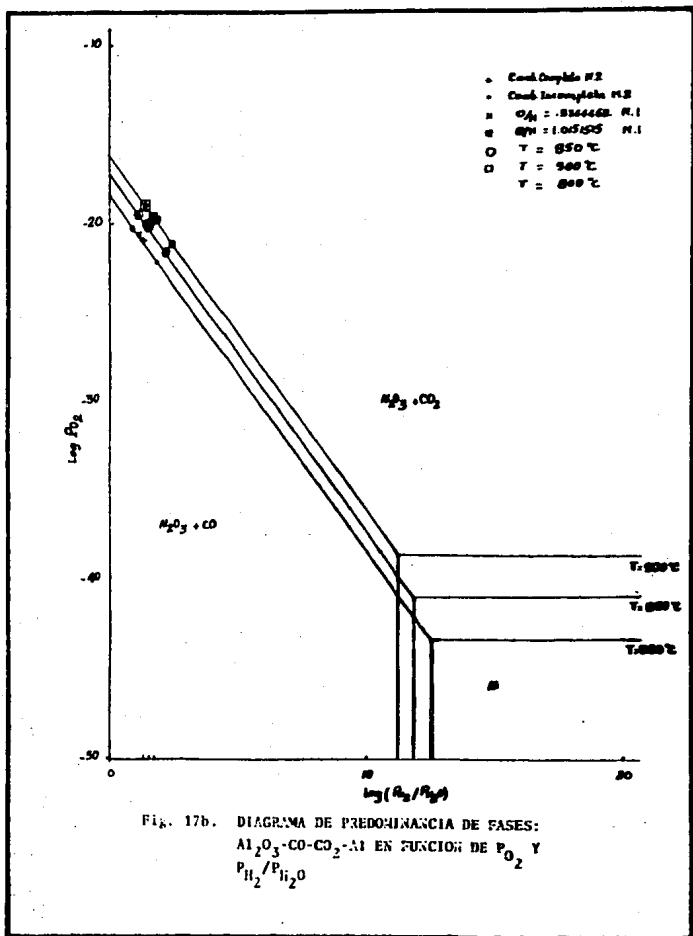
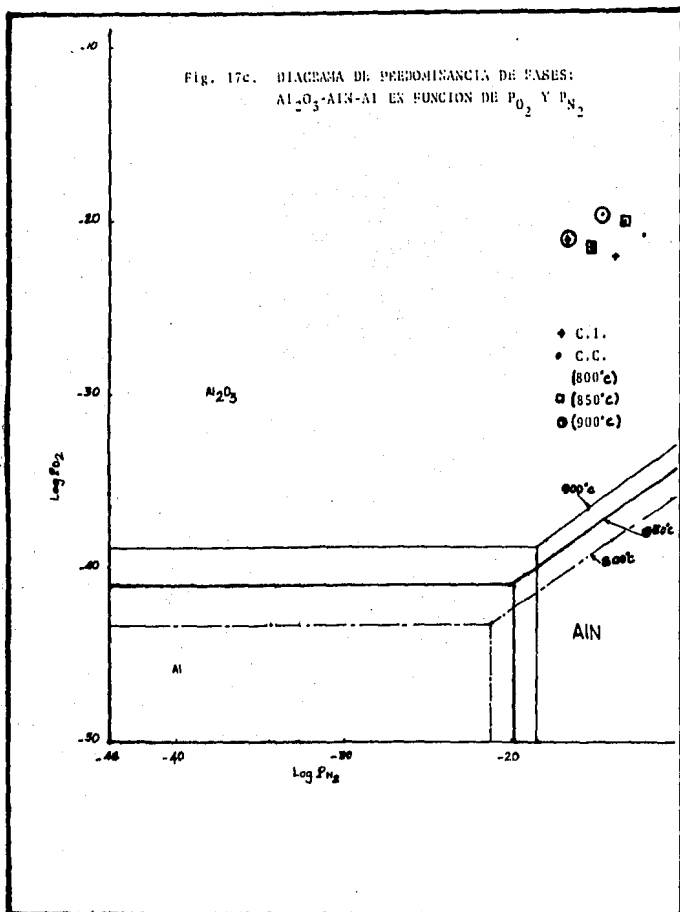


Fig. 17c. DIAGRAMA DE PREDOMINANCIA DE FASES:
 Al_2O_3 - AlN - Al EN FUNCION DE P_{O_2} Y P_{N_2}



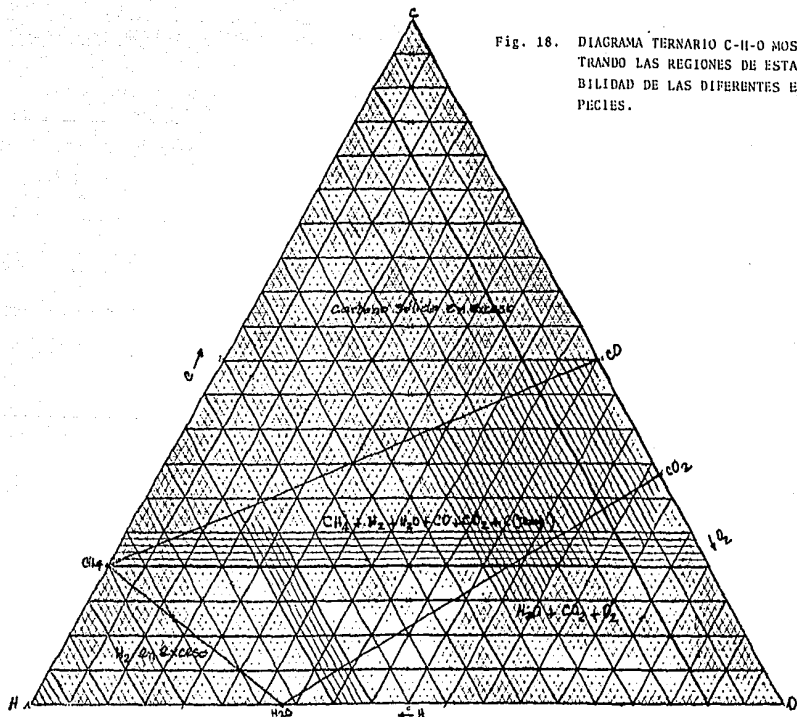


Fig. 18. DIAGRAMA TERNARIO C-H-O MOSTRANDO LAS REGIONES DE ESTABILIDAD DE LAS DIFERENTES ESPECIES.

DISCUSION DE RESULTADOS

Partiendo de la base de que la fusión en el horno de reverbero, es un proceso termoquímico, la presente discusión se divide en dos partes:

1. Reacciones de combustión y
2. Equilibrio metal-gas.

Respecto a las reacciones de combustión, éstas proporcionan no sólo la composición de la atmósfera sino también la energía generada.

En base a los cálculos termodinámicos y de combustión, se observa que es mejor trabajar con relaciones aire-gas menores que la estequiométrica, ya que esto favorece la reacción en forma tal que se incrementen las presiones parciales de CO e H₂. También disminuye los potenciales de O₂ y de N₂ junto con una reducción de la temperatura. Sin embargo, estas relaciones aire-gas no deben ser muy bajas, ya que están sujetas a la energía mínima necesaria para fundir la carga. También, una baja relación aire-combustible favorece un incremento de la actividad del carbono de acuerdo a la relación CH₄/H₂ (24).

En base a los resultados termodinámicos que se encuentran en las tablas XXII-XXIV esta relación CH₄/H₂ aumenta con la temperatura de 298 hasta 650°K debido a las condiciones de equilibrio de la reacción. Las cuales favorecen un incremento continuo de la presión parcial de CH₄ por el bajo valor de la constante de equilibrio (K₁) y por el tipo de relación que hay entre las P_{CH₄} y P_{H₂}, (P_{H₂} = (K₁P_{CH₄}/a_c)^{1/2}).

En base a los análisis químicos de la escoria y de los cálculos termodinámicos que se encuentran en el apéndice I, desde un punto de vista termodinámico existen dos problemas por los cuales se pierde aluminio en la escoria: la oxidación y la formación de nitruro.

Para llegar a dichos resultados fue necesario determinar la composición de la atmósfera del horno tanto durante la combustión completa como durante la combustión incompleta. Para lograr este objetivo se implementaron dos programas de computación para regenerar la atmósfera a la temperatura de trabajo. En estos programas se partió de la termodinámica de las reacciones 47, 48, 49 y 50 que se encuentran en el apéndice I, del cálculo de las constantes de equilibrio respectivas para diversas temperaturas, (298 hasta 1500°K en intervalos de 50°) y de los análisis químicos de la atmósfera del horno a temperatura ambiente que se encuentran en las tablas VIII y XII respectivamente para la combustión completa y para la combustión incompleta.

Los resultados muestran que al disminuir la relación aire-gas disminuye la P_{O_2} . También, ésta disminuye con la reducción de la temperatura, ya que esta última depende de la relación aire-gas como se muestra en la siguiente tabla:

| Temperatura en °C | P_{O_2} Teórica | P_{O_2} Comb. Compl. | P_{O_2} Comb. Inc. |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 800 | $5.6835696 \times 10^{-44}$ | $1.3051534 \times 10^{-21}$ | $8.6362421 \times 10^{-23}$ |
| 850 | $1.5020667 \times 10^{-41}$ | $5.8932744 \times 10^{-21}$ | $2.6786477 \times 10^{-22}$ |
| 900 | $2.4677364 \times 10^{-39}$ | $2.0772251 \times 10^{-20}$ | $7.4792518 \times 10^{-22}$ |

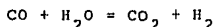
La presión parcial teórica, muestra que para que se evite la oxidación del metal el proceso debe estar prácticamente libre de oxígeno; lo cual es imposible en las condiciones de operación del proceso. Aunque la P_{O_2} tiende a decrecer al disminuir la temperatura, (resultado² de la relación de P_{CO}/P_{CO_2} y/o P_{H_2}/P_{H_2O}). Esta no debe ser menor que la temperatura² de fusión del aluminio. Se observa también que al bajar la relación aire-combustible decrece la P_{O_2} , pero ésta también está sujeta a dicha temperatura.

En cuanto al comportamiento de la relación P_{CO}/P_{CO_2} , los resultados, muestran que al disminuir la relación aire²-gas se incrementa la relación P_{CO}/P_{CO_2} . Por el otro lado, al incrementar la temperatura se aumenta² el valor de la relación P_{CO}/P_{CO_2} debido a que la energía de activación favorece la formación de las especies menos estables. Sin embargo, este incremento en la temperatura acarrearán un aumento en el potencial de oxígeno. Por lo tanto, las presiones parciales de CO no son suficientemente altas con respecto a las de CO_2 para favorecer la reducción de la Al_2O_3 .

Como se observa en la siguiente tabla, la relaciones de P_{CO}/P_{CO_2} reales son muy pequeñas comparadas con las teóricas.

| Temperatura en °C | Relación Teórica P_{CO}/P_{CO_2} | Relación Real (C.C.) P_{CO}/P_{CO_2} | Relación Real (C. Inc.) P_{CO}/P_{CO_2} |
|-------------------|------------------------------------|--|---|
| 800 | 2.5720667×10^{12} | 16.973134 | 65.982749 |
| 850 | 6.4753484×10^{11} | 32.691097 | 153.33806 |
| 900 | 1.8336009×10^{11} | 63.19932 | 333.06199 |

Con respecto a la relación P_{H_2}/P_{H_2O} al igual que en el caso anterior, se observa que tanto en los resultados de la combustión completa como los de la incompleta, las presiones parciales de H_2 no son suficientemente elevadas con respecto a las de H_2O para impedir la formación de la Al_2O_3 . Sin embargo, se puede observar que al incrementar la temperatura y/o disminuir la relación aire-combustible, se aumenta la relación P_{H_2}/P_{H_2O} . Además, como se espera, al incrementar la temperatura se favorece una solubilidad mayor de H_2 en el aluminio líquido. Esta solubilidad del hidrógeno en el baño metálico origina una modificación de la composición de la atmósfera favoreciendo un incremento del potencial de CO_2 , el cual oxida el metal. Este principio es basado de la siguiente relación:



La solubilidad del hidrógeno en el metal líquido, aumenta con el incremento en la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación, llamada Ley de Sievert's:

$$[H] = \sqrt{P_{H_2}} \exp(-\Delta G^\circ/nRT)$$

Donde $[H]$ es la concentración de H_2 en el metal líquido.

P_{H_2} , la presión parcial de H_2 .

ΔG° , la energía libre de Gibbs de la reacción $1/2 H_2 = H$.

T , la temperatura absoluta ($^\circ K$) en la cual se encuentra el metal líquido.

n , el número de moles.

R , la constante de los gases.

Desde un punto de vista económico, no se puede trabajar con las condiciones teóricas, ya que esto significaría un

consumo excesivo de combustible, el cual acarrea otros problemas tales como la formación de carburos de aluminio. De acuerdo a la siguiente relación:

$$a_{\text{Al}_4\text{C}_3} = a_{\text{C}}^3 \exp^{-\Delta G/nRT}$$

$a_{\text{Al}_4\text{C}_3}$ es la actividad del carburo de aluminio.
 a_{C} la actividad del carbono.

De la relación anterior y de esta ecuación: $4\text{Al} + 3\text{C} = \text{Al}_4\text{C}_3$ con un $\Delta G = -63330 + 22.72T$, se observa que entre menor sea la temperatura más negativa es la energía libre de formación de carburo.

Esto hace que la parte exponencial quede positiva ($+\Delta G/nRT$). Este último término se incrementa al disminuir la temperatura.

Por último como se puede observar la siguiente tabla, las relaciones de $P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ reales son muy pequeñas en comparación con las teóricas.

| Temperatura °C | Relación Teórica $P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ | Relación real (C.C.) $P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ | Relación real (C.I.) $P_{\text{H}_2}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ |
|-------------------|---|---|---|
| 800 | 3.088839×10^{12} | 20.383332 | 79.239783 |
| 850 | 6.4983184×10^{11} | 32.811694 | 153.88199 |
| 900 | 1.5613996×10^{11} | 53.817266 | 283.61824 |

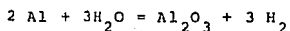
En cuanto al comportamiento de la P_{N_2} , los resultados muestran que éste tiene una tendencia contraria a la de P_{O_2} bajo el efecto de la temperatura. Sin embargo, tienen la misma conducta bajo el efecto de la relación aire-gas, aunque la temperatura sea una consecuencia de esta última. Como se puede observar en la siguiente tabla, el potencial real de N_2 es moderadamente menor que el teórico.

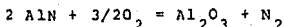
| Temperatura °C | P_{N_2} Teórico | P_{N_2} real (C.C.) | P_{N_2} real (C.I.) |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 800 | $1.8621255 \times 10^{-22}$ | $8.6952266 \times 10^{-13}$ | $1.4800479 \times 10^{-14}$ |
| 850 | $4.8699695 \times 10^{-21}$ | $4.8142378 \times 10^{-14}$ | $4.6651536 \times 10^{-16}$ |
| 900 | 9.54303×10^{-20} | $2.8527136 \times 10^{-15}$ | $1.9490369 \times 10^{-17}$ |

Respecto al equilibrio metal-gas, la composición de la escoria muestra claramente que existen dos fenómenos que ocurren en el proceso. Estos son la oxidación y la formación de nitruro de aluminio.

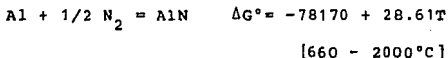
La oxidación del metal mostrada a través de la composición de la escoria está en concordancia con las condiciones de operación del horno.

Esta oxidación ocurre tanto antes como después de que se funde la chatarra. Debido a las condiciones en que se está calentando el metal antes de su fusión, este se oxida de acuerdo a las siguientes reacciones:





Esto denota la importancia que tiene el espesor de la chatarra en el proceso de fusión. En cuanto a la formación del AlN, los resultados del análisis de la escoria muestran que no solo ocurre una oxidación del metal, sino que también se sucede la formación del nitruro del aluminio. Se encontró con los análisis de la escoria que el 84.14% es Al_2O_3 y el 10.50% es AlN. Este nitruro se forma de acuerdo a la siguiente reacción:



Después de tomar en cuenta las actividades de la alumina y del nitruro de aluminio se hizo una comparación entre los datos teóricos y los resultados obtenidos experimentalmente se encontraron las causas de la pérdida del metal en la escoria. Los resultados termodinámicos de equilibrio metal-gas arriba mencionados, se encuentran en el apéndice I y en las figuras 17-a, 17-b y 17-c. De acuerdo con éstos se observa que el horno está operando en condiciones desfavorables, las cuales impiden la protección del metal de una oxidación y/o una formación de AlN.

Esto obedece que una elevada temperatura la oxidación se favorece y que a menor temperatura se forma el AlN, con lo cual crece la P_{N_2} y decrece la de O_2 y viceversa. De acuerdo a la siguiente relación:

$$\frac{P_{\text{O}_2}^{3/2}}{P_{\text{N}_2}} = K \exp(+\Delta G/nRT)$$

$$K = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{AlN}}^2}$$

Donde

CONCLUSIONES

Aún con las limitaciones ya mencionadas en la descripción de resultados a cerca de los equipos de experimentación, ha sido posible determinar las causas de la pérdida del aluminio en la escoria durante el procesado de la chatarra de aluminio en hornos de reverbero. De aquí que las conclusiones sean las siguientes:

1. La temperatura a una determinada relación de aire-gas.

La temperatura nos muestra que conforme se incrementa aumenta el potencial de oxígeno y al mismo tiempo aumentan las relaciones de CO/CO_2 y $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$. Esto significa que a medida en que se incrementa la temperatura, el equilibrio metal-gas se recorre hacia condiciones más estable de la alúmina.

2. La relación aire-combustible a una determinada temperatura.

Los resultados obtenidos de la combustión completa e incompleta, muestran que en la medida en que se decrece la relación aire-gas, aumentan las relaciones de CO/CO_2 y $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$. Esto implica que el potencial de oxígeno se decrece.

De lo que se concluye que por la energía de formación de la alúmina, la cual es muy negativa, es la causa principal de la pérdida de aluminio en la escoria por la oxidación del metal.

Tanto en relaciones estequiométricas de aire-gas como en relaciones mayores a éstas el incremento del potencial de oxígeno es favorecido. Por lo anterior, es aconsejable trabajar con relaciones de aire-gas menores a la estequiométrica.

Sin embargo, estas relaciones de aire-gas deben ser cercanas a la estequiometría para optimizar la energía generada por la combustión del combustible.

En base a los resultados de los cálculos de combustión realizados en el apéndice I, estas relaciones podrían ser de 8:1 hasta 10:1 para este caso, ya que la relación estequiométrica es de 10.35:1 (en volumen).

3. La influencia del espesor de la chatarra.

En base a los resultados de los cálculos realizados respecto al espesor de la chatarra, éste influye notablemente en la pérdida de aluminio en la escoria. Estos cálculos se encuentran en el apéndice II y en la figura 14.

Por lo tanto, es necesario un cálculo de la carga para optimizar la producción minimizando la escoria. También, es necesario hacer una modificación en la secuencia de carga o sea cargando la chatarra gruesa encima de la fina o cargar esta última cuando ya está fundida la primera para evitar así el contacto entre la chatarra fina y los gases calientes.

SUGERENCIAS

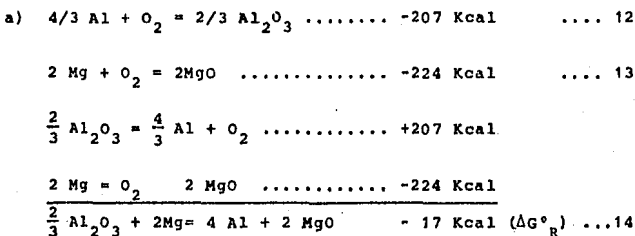
1. En base a los resultados y de los cálculos termodinámicos, se observa que es inevitable la oxidación de la carga. Sin embargo, al utilizar algunos fundentes apropiados tales como los protectores, espumantes y los desoxidantes junto con relaciones de aire-gas menores a la estequiometría y de una buena preparación de carga disminuirán con siderablemente estas pérdidas del aluminio en la escoria.
2. En algunos países se está utilizando el sistema SNIF (25) "Spinning Nozzle Inert Flotation" para separar hidrógeno y otras impurezas (óxidos por ejemplo) del aluminio fundido. Este método de refinación sería recomendable a la em presa, ya que los problemas de laminación (papel) y de anodizado son originados por la presencia de ciertas impu rezas (tal como la Al_2O_3).
3. Como trabajo a futuro sería recomendable un estudio sobre el balance térmico del horno de reverbero, ya que su eficiencia térmica es baja (30%), éste es uno de los problemas principales.

APENDICE I

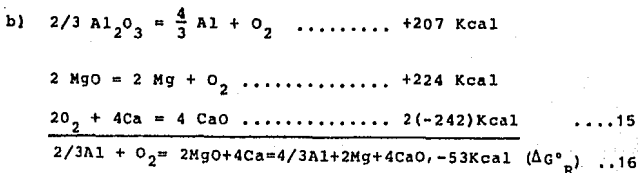
I. CALCULOS TERMODINAMICOS (2, 26-32).

1. Oxidos.- Según la presión de oxígeno del aire los siguientes elementos son reducidos a la temperatura de fusión que se tiene: Si, Cr, Ni, H₂O, Sn, Zn, Cu, Fe, CO₂, Ti y Mn. Los elementos presentes que podrían reducir la alúmina a aluminio son: Mg, Be, K, Na y Ca. El berilio, aún bueno para desoxidar aleaciones de aluminio-magnesio, su uso es muy limitado por ser tóxico, (33).

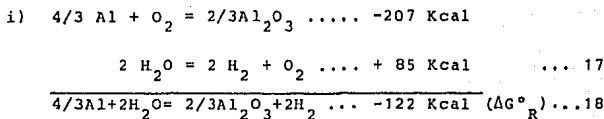
Tomando 1000°C como la temperatura promedio a la cual se trabaja en ALMEXA se tiene:



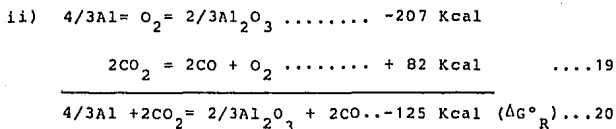
Dado que esta operación origina la formación de nitruros de aluminio, debido que se trabaja con aire y no con oxígeno puro. Más adelante se verá esto en la parte de nitruros. Si se tienen Al y Mg a reducir, entonces se puede usar por ejemplo, calcio.



c) En condiciones de combustión completa se tienen las siguientes condiciones:



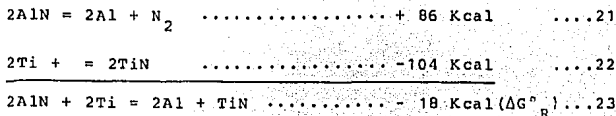
Este hidrógeno a su vez es absorbido por el metal líquido según la ley de Sievert's (2,29).



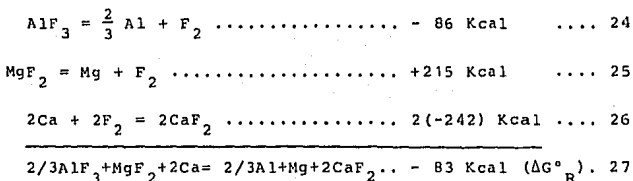
Así, la combustión completa del gas natural origina la oxidación del aluminio por lo tanto la reducción u oxidación de la carga depende de las relaciones $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ y CO/CO_2 .

2. Nitruros.- De todos los elementos aleantes que se tienen en la aleación 1200 sólo el titanio puede reducir el AlN pero esto trae como consecuencia la oxidación del aluminio debido que se usa aire y no nitrógeno puro.

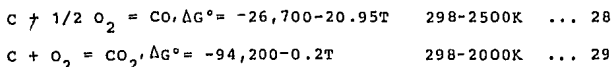
Según la referencia el torio (Th) puede ser la solución para la reducción de la Al_2O_3 y del AlN pero faltaría con firmar sus efectos negativos y su costo alto.



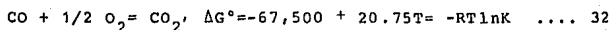
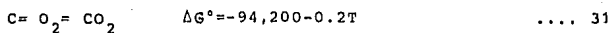
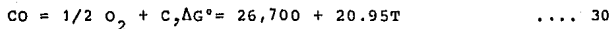
3. Fluoruros.- El fluoruro de aluminio puede ser reducido por los siguientes elementos: Be, K, Na, Mg, Li y Ca. Aquí también si se necesita prever las pérdidas del magnesio en el aluminio, el calcio es una solución viable.



Los cambios termodinámicos están acompañados, en general, por cierta liberación o absorción de calor. Es evidente que el contenido de energía total de un sistema existente antes de un cambio químico es diferente del contenido de energía del sistema después de dicho cambio. Este es acompañado por una redistribución de energía en la que existe una liberación o absorción de energía. Si se considera que una parte del cambio de la energía total, se da mediante las reacciones siguientes:



y se suma la ecuación 29 al inverso de la 28 se tiene:



$$\text{a } T = 800^\circ\text{C} = 1073\text{K}$$

$$\Delta G^\circ_R = -45,235.25 = -RT \ln K$$

$$\text{Entonces } K = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}} P_{\text{O}_2}^{1/2}} = 1.64 \times 10^9$$

$$\text{Para } T = 850^\circ\text{C} = 1123\text{K}$$

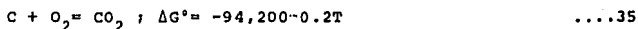
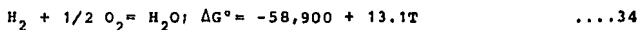
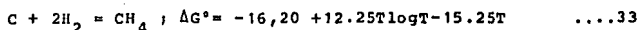
$$\Delta G^\circ_R = -44,197.75 = -RT \ln K$$

$$\text{Para } T = 900^\circ\text{C} = 1173\text{K}$$

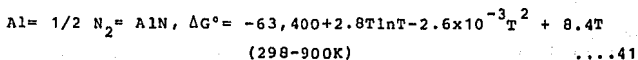
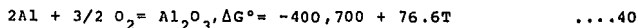
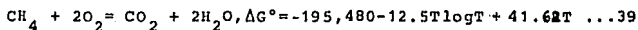
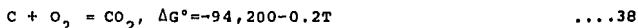
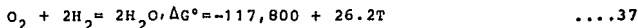
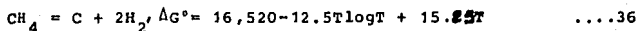
$$\Delta G^\circ = -43,160.25 = -RT \ln K$$

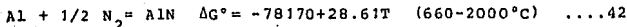
$$\text{Entonces } K = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}} P_{\text{O}_2}^{1/2}} = 1.10 \times 10^8$$

Para calcular la energía libre de reacción y la entalpía de la misma, se tienen las siguientes reacciones:



Multiplicando la ecuación 33 por menos uno (-1), luego la 34 por dos (2) y sumando estas tres últimas ecuaciones, se tiene:





METODO I

Este método sirve para regenerar la composición de la atmósfera del horno a las temperaturas de trabajo a partir de los resultados obtenidos a temperatura ambiente.

El sistema CHO es de gran importancia en la tecnología moderna incluyendo muestras de combustible, procesos de gasificación de combustible, producción de hidrógeno y procesos de síntesis químicas (34). Se considera que la composición de la fase gaseosa en el diagrama CHO está en equilibrio con el grafito en el rango de temperaturas 298-1500K a la presión de una atmósfera para relaciones atómicas de O/H de 0.0263157 a 9.5.

Consideraciones Termodinámicas Generales.

En primer lugar antes de considerar los métodos computacionales, se tomaron sólo en cuenta el sistema y los compuestos químicos de interés, ya que influyen en la selección del método. Los compuestos más importantes son los más estables bajo las condiciones de interés, y los que tienen el más bajo valor de energía libre de formación.

En el sistema que contiene los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno en el rango de las temperaturas de 298 a 1,500K y a una presión de una atmósfera, los elementos más estables son: el Carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua, metano y otras especies como el etano, propano y algunos otros hidrocarburos menos estables. Con el fin

de realizar cálculos termodinámicos más rigurosos, sería necesario considerar compuestos que contienen los elementos C, H y O.

Las bajas presiones favorecen las especies de más bajo peso molecular, por lo tanto en sistemas donde la presión parcial de H_2 es mucho menor que una atmósfera (10^{-5} atm. a 298K tales que en los casos que se consideran para O/H igual a 0.3264462 ó a 1.0151515), la cantidad de las especies hidrocarbonadas de la fase gaseosa de alto peso molecular, decrece con la potencia $(n+1)$ de la presión parcial de hidrógeno. Donde n es el número de átomos de carbono en las especies que son consideradas; como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$nC + (n+1)H_2 = C_n H_{2n+2} \quad \dots\dots 43$$

$$kf = \frac{(P_{C_n H_{2n+2}})}{(P_{H_2})^{n+1}} \quad \dots\dots 44$$

$$(P_{C_n H_{2n+2}}) = K_f (P_{H_2})^{n+1} \quad \dots\dots 45$$

En base a la discusión anterior, las 6 especies H_2 , H_2O , C, CH_4 , CO y CO_2 se consideran las más importantes. Una restricción final puede ser hecha después de los cálculos efectuados sobre las 6 especies antes mencionadas.

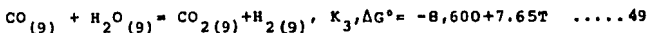
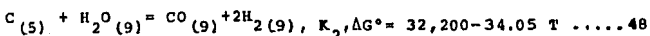
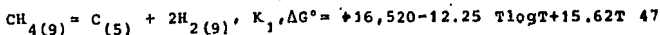
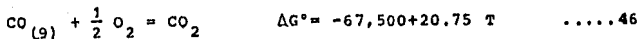
Esta restricción consiste en calcular la presión parcial de las especies de prueba usando la ecuación 45 ó una similar junto con la presión parcial de H_2 previamente calculada y comparar el resultado de las de los otros compuestos en el sistema. Si el valor es pequeño comparado con las otras presiones parciales, entonces es válido suponer la ausencia

de dichas especies.

En la literatura se encuentran dos métodos generales para calcular el equilibrio químico del sistema CHO: i).- Soluciones algebraicas de constantes de equilibrio y ecuaciones de balance de material (26, 35-46), y ii).- La minimización de la energía libre del sistema (2, 26-31, 44).

En este trabajo se utilizó la solución algebraica directa de un conjunto de ecuaciones lineales, las cuales fueron obtenidas de las ecuaciones de balance de material. En el caso de las ecuaciones de las constantes de equilibrio estándar se empleó la forma no lineal.

El sistema está compuesto de 6 componentes y 2 fases. La regla de las fases indica que existen 6 grados de libertad en el sistema que son necesarios para una definición completa de éste. Estos grados de libertad fueron escogidos como: La temperatura, la presión, un parámetro de balance de material y 3 ecuaciones de constantes de equilibrio que colectivamente incluyen todas las 6 especies. Como un parámetro de balance de material, se usó la condición de una mol total de reactivos (α moles de H_2O , β moles de CO_2 y $(1-\alpha-\beta)$ moles de CH_4) conteniendo una relación fija O/H. También se consideró la temperatura fija y se varió la relación O/H, conservando los otros parámetros en las mismas condiciones que en el caso anterior. La composición de la fase gaseosa, como se muestra es fácilmente determinada por la regla de las fases y por la relación O/H y es independiente de la identidad química de los gases reactantes. Las 3 ecuaciones químicas escogidas para unir a las 6 especies fué a través de las leyes de balance de material y de acción de masa, las cuales fueron (47, 48 y 49) las siguientes:



De acuerdo al balance de materiales se tiene:

TABLA (23).

| Especies | Moles de entrada | Moles de equilibrio |
|-----------------------|----------------------|--|
| C | 0 | $[1/2 z + 3/2 Y + X - 3/2 \alpha - \beta]$ |
| CH ₄ | $1 - \alpha - \beta$ | $[1 - (1/2 \alpha + \beta) - 1/2 (Y + z)]$ |
| CO | 0 | $[2(\beta - X) - (Y - \alpha)]$ |
| CO ₂ | | X |
| H ₂ | 0 | Z |
| H ₂ O | | Y |
| Total de moles | 1 | $[1 - \alpha + Y + z]$ |
| Total de moles de gas | 1 | $[1 + 1/2 \alpha + \beta - X - 1/2 Y + 1/2 z]$ |

De la ecuación 49, se obtiene el valor de X como función de Y y Z.

De la ecuación 47, se obtiene el valor de Y como función de Z.

De la ecuación 48, se obtiene una ecuación de la siguiente forma:

$$Az^4 + Bz^3 + Cz^2 + Dz + E = 0$$

Para llegar a esta ecuación de cuarto grado, se consideró que la actividad del carbono es igual a uno.

De la ecuación 49 y de las moles de las especies gaseosas en equilibrio con la actividad del carbono, se tiene:

$$K_3 = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} = \frac{XZ}{[\alpha + 2\beta - 2X - Y]Y}$$

$$XZ = K_3 (\alpha + 2\beta - Y)Y - 2K_3XY$$

$$X(Z + 2K_3Y) = K_3 (\alpha + 2\beta - Y)Y$$

Por lo tanto:

$$X = \frac{K_3 (\alpha + 2\beta - Y)Y}{(Z + 2K_3Y)}$$

De la reacción 47, se tiene:

$$K_1 = \frac{[C][H_2]^2}{[CH_4]} = \frac{[H_2]^2}{[CH_4]} = \frac{P_{H_2}^2}{P_{CH_4}} = \frac{Z^2}{1 - (1/2 \alpha + \beta) - 1/2 (Y + Z)}$$

$$K_1 [1 - (1/2 \alpha + \beta) - 1/2 (Y + Z)] = Z^2 \quad \text{6} \quad K_1 (1 - 1/2 \alpha - \beta - 1/2 Z) - 1/2 K_1 Y = Z^2$$

$$K_1 (1 - 1/2 \alpha - \beta - 1/2 Z) - Z^2 = 1/2 K_1 Y$$

$$Y = \frac{2K_1 (1 - 1/2 \alpha - \beta - 1/2 Z) - 2Z^2}{K_1}$$

De la reacción 48, se tiene:

$$K_2 = \frac{[CO][H_2]}{[C][H_2O]} = \frac{P_{CO}^x P_{H_2}}{P_{H_2O}} = \frac{(\alpha + 2\beta - 2X - Y)Z}{Y}$$

$$K_2 Y = (\alpha + 2\beta - 2X - Y)Z = (\alpha + 2\beta - Y)Z - 2XZ$$

6

$$2XZ = (\alpha + 2\beta - Y)Z - K_2 Y$$

$$X = \frac{(\alpha + 2\beta - Y)Z - K_2 Y}{2Z}$$

Igualando los dos valores de X obtenidos de las ecuaciones 48 y 49 y sustituyendo Y por su valor de la ecuación 47, se obtiene la siguiente ecuación de cuarto grado:

$$4(2k_2 K_3 - K_1)Z^4 + K_1[2K_2(4K_3 - 1) - K_1]Z^3 + 2[K_1 K_2 K_3 \{K_1 - \beta(1 - \frac{1}{2}\alpha - \beta)\} + K_1^2(1 - \alpha - 2\beta - \frac{1}{2}K_2)]Z^2 + 2K_1^2 K_2(1 - \frac{1}{2}\alpha - \beta)(1 - 4K_3)Z + 8K_1^2 K_2 K_3(1 - \frac{1}{2}\alpha - \beta)^2 = 0$$

.....51

Por medio de las constantes de equilibrio de 298-1500K de la Tabla XV y de las constantes de mezcla y de la Tabla XVI se calcularon los coeficientes de la ecuación 51. En la Tabla XVII se tomaron las tres temperaturas de trabajo (800, 850 y 900°C) fijas y se fueron variando las relaciones O/H para calcular los coeficientes A, B, C, D y E. Para calcular los coeficientes A, B, C, D y E respectivos, los cuales se muestran en la tabla XVIII, se mantuvieron fijas las relaciones de mezcla O/H y se varió la temperatura de 298 a 1500°K.

La Tabla XIX, muestra que conforme se aumenta la temperatura, a una relación de mezcla dada, aumenta el contenido

de hidrógeno. Esta muestra también, que a mayor relación de mezcla, menor es el contenido de hidrógeno en una misma temperatura.

La Tabla XX, confirma lo mostrado en la Tabla XIX al fijar la temperatura, el contenido de hidrógeno disminuye conforme se aumenta la relación de mezcla. Para una misma relación a mayor temperatura mayor es el contenido de hidrógeno.

La Tabla XXI, muestra que conforme disminuye el contenido de hidrógeno, disminuye también el del metano, mientras que los contenidos de H_2O y de CO_2 crecen, hasta alcanzar un máximo y después decrecen; y por último el del CO es creciente cuando decrece el H_2 .

La Tabla XXII, muestra que al ir variando ascendentemente la temperatura el H_2 y CO aumentan, mientras disminuye el H_2O . En cuanto al CO_2 y CH_4 se incrementan hasta un máximo y luego decrecen.

METODO II

En este método se parte de las presiones parciales de los productos de combustión obtenidos tanto de la combustión completa como de la incompleta a partir de temperatura ambiente y de las reacciones de equilibrio para encontrar las composiciones de la atmósfera del horno a temperaturas de trabajo. Por medio de un cálculo iterativo se pudo establecer un programa de computación que dió los resultados que se encuentran en las Tablas: XXIII y XXIV.

Estas tablas muestran respectivamente la composición de la atmósfera en diferentes temperaturas (298 a 1500 K) para combustión completa e incompleta.

Partiendo de la reacción 50 y considerando que la actividad del carbono es igual a uno, se tiene la siguiente relación:

$$K_4 = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = \frac{(a+x)^2}{(b-x)}$$

$$K_4 (b-x) = (a+x)^2$$

Desarrollando esta igualdad entonces:

$$K_4 b - K_4 x = a^2 + 2ax + x^2$$

De esta ecuación, se tiene una ecuación de segundo grado:

$$x^2 + (2a+K_4)x + (a^2-K_4b) = 0$$

Por lo tanto su solución será de acuerdo a:

$$x = \frac{-(2a+K_4) \pm \sqrt{(2a+K_4)^2 - 4(a^2-K_4b)}}{2} = \frac{-(2a+K_4) \pm \sqrt{4K_4(a+b+K_4/4)}}{2}$$

En este caso el valor de X estará comprendido entre: $-a \leq x < b$.

De la reacción 49, se tiene:

$$K_3 = \frac{\left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}\right) \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}}\right)}{\left(\frac{P_{CO}}{P_{CO}}\right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}}\right)} = \frac{(b-x)(c+y)}{(a+x)(d-y)}$$

$$\frac{\left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}}\right)^2}{\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}}\right)} = \frac{(c+y)}{(d-y)} = \frac{K_3 K_4}{P_{CO}} = \alpha$$

6

$$\alpha(d-y)=(c+y) \text{ ó } \alpha d - \alpha y = c+y$$

$$(\alpha d - c) = (\alpha + 1)y$$

Entonces:

$$y = \frac{(\alpha d - c)}{(\alpha + 1)}$$

Donde a, b, c y d son las presiones o (moles) calculadas del paso anterior.

De la reacción 47 se tiene:

$$K_1 = \frac{(P_{H_2}^2)}{(P_{CH_4})} = \frac{(c+y)^2}{CH_4}$$

Por consiguiente:

$$CH_4 = \frac{(c+y)^2}{K_1}$$

II. REACCIONES DE COMBUSTION.

1. Influencia de la relación aire-combustible en la composición de la atmósfera y en la energía.

a) Relación estequiométrica de aire-gas natural.

Para un metro cúbico del gas usado en ALMEXA, se ob tiene lo siguiente:

| Reacciones | O ₂ | CO ₂ | H ₂ O | N ₂ |
|--|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O | 1.7284 | 0.8642 | 1.7284 | 6.4988 |
| C ₂ H ₆ + 3.5O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O | 0.3514 | 0.2008 | 0.3012 | 1.3213 |
| C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O | 0.0925 | 0.0555 | 0.0740 | 0.3478 |
| CO ₂ del gas natural | - | 0.0012 | - | - |
| N ₂ del gas natural | - | - | - | 0.0157 |
| Total | 2.1723 | 1.1217 | 2.1036 | 8.1836 |

Volumen de aire requerido:

$$2.1723/0.21 = 10.344 \text{ m}^3 \text{ y } 10.35 \text{ m}^3$$

Composición de los gases resultantes:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 9.832\% \\ \text{N}_2\text{O} &= 18.438\% \\ \text{N}_2 &= 71.730\% \end{aligned}$$

Al considerar que estos gases resultantes salen de la cámara del horno con una temperatura de: 800, 850 ó 900 C, el calor aprovechable será respectivamente de:

$$9315.121 \text{ Kcal} - (3.7115002 \times 800 + 3.861722 \times 10^{-4} (800)^2) = 6098.7706 \text{ Kcal}$$

$$9315.121 \text{ Kcal} - (3.7115002 \times 850 + 3.861722 \times 10^{-4} (850)^2) = 5881.3364 \text{ Kcal}$$

$$9315.121 \text{ Kcal} - (3.7115002 \times 900 + 3.861722 \times 10^{-4} (900)^2) = 5661.9713 \text{ Kcal.}$$

Si el aire es húmedo, esta humedad también absorberá energía. Esto hará que el volumen total del aire húmedo sea mayor que la cantidad estequiométrica, si por ejemplo se está trabajando con una relación estequiométrica.

- b) Si se está trabajando con una relación de aire-gas mayor que la estequiométrica, por ejemplo con un 16% de aire se co en exceso.

El volúmen de aire en exceso será de:

$$.16 \times 10.3444 = 1.6551 \text{ m}^3$$

El volúmen de aire total es de:

$$1.6551 + 10.3444 = 11.9995 = 12 \text{ m}^3$$

Volúmen de O_2 libre (o en exceso):

$$.21 \times 1.6551 = 0.3476m^3$$

Volúmen de N_2 del aire en exceso:

$$1.6551 - 0.3476 = 1.3075m^3$$

Volumen de H_2 total:

$$8.1836 + 1.3075 = 9.4911m^3$$

Composición de los gases resultantes:

$$CO_2 = 8.586\%$$

$$H_2O = 16.102\%$$

$$O_2 = 2.661\%$$

$$N_2 = 72.651\%$$

El calor aprovechable, si los gases resultantes del horno con una temperatura de: 800, 850 ó 900°C.

Para $T = 800$ C, $Q = 5675.594$ Kcal/ m^3 de G.N.

Para $T = 850$ C, $Q = 5430.1644$ Kcal/ m^3 de G.N.

Para $T = 900$ C, $Q = 5182.6213$ Kcal/ m^3 de G.N.

En estos casos, se puede usar la ley de Kirchoff (7), para encontrar las condiciones térmicas y el calor de reacción del combustible.

- c) Si se está trabajando con una relación de aire-gas menor que la estequiométrica, por ejemplo una relación de 8:1, se tiene la tabla siguiente:

| Reacciones | O ₂ | CO | CH ₂ | CO ₂ | H ₂ O | CH ₄ | N ₂ |
|-----------------------------------|----------------|-------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|
| $C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + H_2O$ | 0.0925 | - | - | .0555 | 0.740 | - | .3478 |
| $C_2H_6 + 3.5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$ | .3514 | - | - | .2008 | .3012 | - | 1.3213 |
| $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ | 1.074 | - | - | .5370 | 1.074 | - | 4.0382 |
| $2CH_4 + O_2 = 2CO + 4H_2$ | .1621 | .3242 | .6484 | - | - | - | .6095 |
| CH ₄ remanente | - | - | - | - | - | 0.003 | - |
| CO ₂ del gas | - | - | - | .0012 | - | - | - |
| N ₂ del gas | - | - | - | - | - | - | .0157 |
| Total | 1.680 | .3242 | .6484 | .7945 | .4492 | 0.003 | .3325 |

Composición de los gases resultantes:

$$CO_2 = 8.318\%$$

$$H_2O = 15.172\%$$

$$CO = 3.394\%$$

$$CH_4 = 0.031\%$$

$$H_2 = 6.788\%$$

$$N_2 = 66.295\%$$

En este último, el calor aprovechable se calcula mediante la ley de Hess (7).

Temperatura de Flama (7)

Dado que se tiene la composición del gas combustible, se puede calcular la temperatura de flama.

Composición del gas natural

| | |
|---------------------------------|--------|
| CH ₄ = | 86.42% |
| CO ₂ = | 0.12% |
| C ₂ H ₆ = | 10.04% |
| C ₃ H ₈ = | 1.85% |
| N ₂ = | 1.57% |

Considerando que se tiene un volumen de gas combustible igual a 1 m³, entonces la energía que producirá éste sería:

| | | | |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| CH ₄ : | 8,560 Kcal/m ³ | x 0.8642 m ³ | = 7397.552 Kcal |
| C ₂ H ₆ : | 15,110 Kcal/m ³ | x 0.1004 m ³ | = 1511.044 kcal |
| C ₂ H ₈ : | 21,650 Kcal/m ³ | x 0.0185 m ³ | = 400.525 Kcal |
| Total | | | 9315.121 Kcal/m ³ de gas |

Cantidad de gase producidos por m³ de gas natural.

| Reacciones | CO ₂ | H ₂ O | N ₂ |
|---|-----------------|------------------|----------------|
| CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O | 0.8642 | 1.7284 | 6.4988 |
| C ₂ H ₆ + $\frac{7}{2}$ O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O | 0.2008 | 0.3012 | 1.3213 |
| C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O | 0.0555 | 0.7040 | 0.3478 |
| CO ₂ del gas natural | 0.0012 | - | - |
| N ₂ del gas natural | - | - | 0.0157 |
| Total | 1.1217 | 2.1036 | 8.1836 |

Temperatura de flama;

$$9315.121 \text{ Kcal} = 1.1217 \times (0.406 + 0.000090T) + 2.1036 \times (0.373 + 0.000050)T + 8.1836 \times (0.302 + 0.000022T)T$$

$$9315.121 = 3.7115002T + 3.861722 \times 10^{-4} T^2$$

Por lo tanto $T = 2065.7816^\circ \text{C}$

Temperatura Teórica (47).

Volumen de aire teórico

$$L_v = aH_u + b = 2.6 \times 10^{-4} \times 9315.121 + 0.25 = 2.1719315 \text{ m}^3$$

Volumen de gas resultantes

$$V_v = CH_u + d = 2.7 \times 10^{-4} \times 9315.121 = 2.7650827 \text{ m}^3$$

Volumen real de gas de combustión

$$V = V_v + (n-1)L_v = 2.68 + (1.1-1) \times 2.1717315 = 2.9822758 \text{ m}^3$$

Temperatura teórica

$$T = \frac{H_u}{C_v V} = \frac{9315.121}{1.55 \times 2.98 - 2758} = 2015.1575^\circ \text{C}$$

De estos dos métodos de cálculo la temperatura de flama, se observa que al tomar las mismas condiciones (relaciones de aire-gas) el resultado es el mismo prácticamente. Por lo tanto, esto demuestra que no importa el camino sino de las condiciones de partida.

TABLA I

Resultados obtenidos del análisis de gas natural usado en el proceso de fusión de aluminio en ALMEXA (Composición del gas natural por muestra en peso).

| No.de muestra | Compuestos | Porcentaje en peso | No.de muestra | Compuestos | Porcentaje en peso |
|---------------|-------------------------------|--------------------|---------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | N ₂ | 2.7052 | 5 | N ₂ | 2.2347 |
| | CH ₄ | 75.4297 | | CH ₄ | 76.6432 |
| | CO ₂ | 0.3977 | | CO ₂ | 0.1998 |
| | C ₂ H ₆ | 16.0882 | | C ₂ H ₆ | 17.0528 |
| | C ₃ H ₈ | 5.3792 | | C ₃ H ₈ | 3.8695 |
| 2 | N ₂ | 2.7158 | 6 | N ₂ | 2.2622 |
| | CH ₄ | 75.6930 | | CH ₄ | 76.8395 |
| | CO ₂ | 0.3840 | | CO ₂ | 0.1975 |
| | C ₂ H ₆ | 15.8894 | | C ₂ H ₆ | 16.9567 |
| | C ₃ H ₈ | 5.3178 | | C ₃ H ₈ | 3.7440 |
| 3 | N ₂ | 2.6302 | 7 | N ₂ | 2.2603 |
| | CH ₄ | 75.4820 | | CH ₄ | 76.7688 |
| | CO ₂ | 0.3480 | | CO ₂ | 0.2037 |
| | C ₂ H ₆ | 16.0677 | | C ₂ H ₆ | 17.0750 |
| | C ₃ H ₈ | 5.4721 | | C ₃ H ₈ | 3.6922 |
| 4 | N ₂ | 2.2184 | | | |
| | CH ₄ | 76.6113 | | | |
| | CO ₂ | 0.1975 | | | |
| | C ₂ H ₆ | 17.0778 | | | |
| | C ₃ H ₈ | 3.8950 | | | |

TABLA II

La composición promedio del gas natural en peso

| Compuestos | Porcentaje en peso | |
|-------------------------------|--------------------|--------|
| N ₂ | 2.4324 | 2.43% |
| CH ₄ | 76.2096 | 76.21% |
| CO ₂ | 0.2755 | 0.28% |
| C ₂ H ₆ | 16.6011 | 16.60% |
| C ₃ H ₈ | 4.4814 | 4.48% |

TABLA III

Composición promedio del gas natural en Volumen

| Compuestos | Porcentaje en Volumen |
|-------------------------------|-----------------------|
| N ₂ | 1.57 |
| CH ₄ | 86.42 |
| CO ₂ | 0.12 |
| C ₂ H ₆ | 10.04 |
| C ₃ H ₈ | 1.85 |

Nota: Existen trazas de butano, isobutano y agua que no se pudieron cuantificar con las condiciones utilizadas que fueron las siguientes:

Tipo de columnas: Porapak Q 80/100 mallas de 3mx1/8 pulgadas.

Temperaturas:

- Columnas: 85°C
- Inyector: 170°C
- Detecror: 170°C

Tipo de gas de arrastre: Helio

Flujo de gas de arrastre: 45 ml/min.

Velocidad del graficador: 10 mm/min.

TABLA IV

Composición atómica del gas natural para ser graficados en un diagrama ternario C-H-O.

| Compuestos | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------------------------------|--------|--------|------|----------------------|
| CH ₄ - 86.42 | 86.42 | 345.68 | - | %C=21.04 %H=78.92 |
| CO ₂ - 0.12 | 0.12 | - | 0.24 | |
| C ₂ H ₆ - 10.04 | 20.08 | 60.24 | - | |
| C ₃ H ₈ - 1.85 | 5.55 | 14.80 | - | |
| Total | 112.17 | 420.72 | 0.24 | %O=0.05 |

TABLA V

Resultados obtenidos del análisis de los gases de combustión durante la combustión completa (Composición del gas de combustión por muestra en peso).

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso |
|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 1 | CO ₂ | 10.82 | 12 | CO ₂ | 11.06 |
| | H ₂ O | 1.52 | | H ₂ O | 0.98 |
| | O ₂ | 2.45 | | O ₂ | 2.00 |
| | N ₂ | 85.21 | | N ₂ | 85.96 |
| 2 | CO ₂ | 9.80 | 13 | O ₂ | 2.80 |
| | H ₂ O | 1.55 | | N ₂ | 85.84 |
| | O ₂ | 4.30 | | CO ₂ | 10.46 |
| | N ₂ | 85.15 | | H ₂ O | 0.90 |
| 3 | CO ₂ | 8.52 | 14 | CO ₂ | 10.28 |
| | H ₂ O | 1.25 | | H ₂ O | 0.94 |
| | O ₂ | 4.30 | | O ₂ | 3.10 |
| | N ₂ | 85.93 | | N ₂ | 85.68 |
| 4 | CO ₂ | 8.26 | 15 | CO ₂ | 10.49 |
| | H ₂ O | 1.47 | | H ₂ O | 0.90 |
| | O ₂ | 4.30 | | O ₂ | 2.80 |
| | N ₂ | 85.97 | | N ₂ | 85.81 |

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso |
|----------------|---|-------------------------------|----------------|---|-------------------------------|
| 5 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.26 1.83 3.95 84.96 | 16 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.50 2.52 3.80 84.18 |
| 6 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.07 1.57 4.15 85.21 | 17 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.21 1.26 4.00 85.53 |
| 7 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.04 1.80 4.15 85.01 | 18 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 9.67 2.13 3.50 84.70 |
| 8 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 8.96 1.50 4.20 85.34 | 19 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.38 1.90 4.30 86.42 |
| 9 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.74 0.81 4.30 87.15 | 20 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.64 0.84 4.30 87.22 |
| 10 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.68 0.71 4.30 87.31 | 21 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 8.43 1.28 4.30 85.99 |
| 11 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.85 1.04 4.30 86.81 | | | |

TABLA VI

Composición del gas de combustión (en % Vol.) durante la combustión completa.

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en Volumen | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en Volumen |
|----------------|---|-------------------------------|----------------|---|-------------------------------|
| 1 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.13 2.45 2.22 88.21 | 2 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 6.44 2.49 3.16 87.91 |
| 3 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.59 2.01 3.88 88.52 | 4 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.41 2.35 3.87 88.38 |
| 5 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 6.07 2.93 3.56 87.45 | 6 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.95 2.51 3.75 87.79 |
| 7 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.92 2.88 3.74 87.46 | 8 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.87 2.41 3.79 87.93 |
| 9 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.07 1.30 3.87 89.75 | 10 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.04 1.14 3.88 89.95 |
| 11 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 5.14 1.66 3.87 89.32 | 12 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 7.31 1.58 1.82 89.29 |
| 13 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 6.91 1.45 2.54 89.10 | 14 | CO ₂ H ₂ O O ₂ N ₂ | 6.79 1.52 2.81 88.88 |

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en Volumen | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en Volumen |
|----------------|------------------|-----------------------|----------------|------------------|-----------------------|
| 15 | CO ₂ | 6.93 | 16 | CO ₂ | 6.20 |
| | H ₂ O | 1.45 | | H ₂ O | 4.02 |
| | O ₂ | 2.54 | | O ₂ | 3.41 |
| | N ₂ | 89.07 | | N ₂ | 86.36 |
| 17 | CO ₂ | 6.05 | 18 | CO ₂ | 6.33 |
| | H ₂ O | 2.02 | | H ₂ O | 3.41 |
| | O ₂ | 3.61 | | O ₂ | 3.15 |
| | N ₂ | 88.31 | | N ₂ | 87.11 |
| 19 | CO ₂ | 4.80 | 20 | CO ₂ | 5.00 |
| | H ₂ O | 3.02 | | H ₂ O | 1.34 |
| | O ₂ | 3.85 | | O ₂ | 3.87 |
| | N ₂ | 88.33 | | N ₂ | 89.78 |
| 21 | CO ₂ | 5.52 | | O ₂ | 3.87 |
| | H ₂ O | 2.05 | | N ₂ | 88.55 |

TABLA VII

Composición atómica del gas resultante en un diagrama ternario C-H-O (Resultado de la combustión completa).

| No. de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|----------------|-----------------------|------|------|-------|---|
| 1 | CO ₂ -7.13 | 7.13 | - | 14.26 | Σ = 33.18 %C = 21.49 %H = 14.77 %O = 63.74 |
| | H ₂ O-2.45 | - | 4.90 | 2.45 | |
| | O ₂ -2.22 | - | - | 4.44 | |
| | | 7.13 | 4.90 | 21.15 | |
| 2 | CO ₂ -6.44 | 6.44 | - | 12.88 | Σ = 33.11 %C = 19.45 %H = 15.04 %O = 65.51 |
| | H ₂ O-2.49 | - | 4.98 | 2.49 | |
| | O ₂ -3.16 | - | - | 6.32 | |
| | | 6.44 | 4.98 | 21.69 | |

| No.de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------|-------------------------|------|------|-------|---|
| 3 | CO ₂ - 5.59 | 5.59 | - | 11.18 | Σ = 30.56 %C = 18.29 %H = 13.15 %O = 68.55 |
| | H ₂ O - 2.01 | - | 4.02 | 2.01 | |
| | O ₂ - 3.88 | - | - | 7.76 | |
| | | 5.59 | 4.02 | 20.95 | |
| 4 | CO ₂ - 5.41 | 5.41 | - | 10.82 | Σ = 31.02 %C = 17.44 %H = 15.15 %O = 67.41 |
| | H ₂ O - 2.35 | - | 4.70 | 2.35 | |
| | O ₂ - 3.87 | - | - | 7.74 | |
| | | 5.41 | 4.70 | 20.91 | |
| 5 | CO ₂ - 6.07 | 6.07 | - | 12.14 | Σ = 34.12 %C = 17.79 %H = 17.17 %O = 65.04 |
| | H ₂ O - 2.93 | - | 5.86 | 2.93 | |
| | O ₂ - 3.56 | - | - | 7.12 | |
| | | 6.07 | 5.02 | 21.19 | |
| 6 | CO ₂ - 5.95 | 5.95 | - | 11.90 | Σ = 32.88 %C = 18.10 %H = 15.27 %O = 66.64 |
| | H ₂ O - 2.51 | - | 5.02 | 2.51 | |
| | O ₂ - 3.75 | - | - | 7.50 | |
| | | 5.95 | 5.02 | 21.91 | |
| 7 | CO ₂ - 5.92 | 5.92 | - | 11.84 | Σ = 33.88 %C = 17.47 %H = 17.00 %O = 65.53 |
| | H ₂ O - 2.88 | - | 5.76 | 2.88 | |
| | O ₂ - 3.74 | - | - | 7.48 | |
| | | 5.92 | 5.76 | 22.20 | |
| 8 | CO ₂ - 5.87 | 5.87 | - | 11.74 | Σ = 32.42 %C = 18.11 %H = 14.87 %O = 67.03 |
| | H ₂ O - 2.41 | - | 4.82 | 2.41 | |
| | O ₂ - 3.79 | - | - | 7.58 | |
| | | 5.87 | 4.82 | 21.73 | |

| No. de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|----------------|-------------------------|------|------|-------|--------------------|
| 9 | CO ₂ - 5.07 | 5.07 | - | 10.14 | Σ = 26.85 |
| | H ₂ O - 1.30 | - | 2.60 | 1.30 | %C = 18.88 |
| | O ₂ - 3.87 | - | - | 7.74 | %H = 9.68 |
| | | 5.07 | 2.60 | 19.18 | %O = 71.43 |
| 10 | CO ₂ - 5.04 | 5.04 | - | 10.08 | Σ = 26.30 |
| | H ₂ O - 1.14 | - | 2.28 | 1.14 | %C = 19.16 |
| | O ₂ - 3.88 | - | - | 7.76 | %H = 8.67 |
| | | 5.04 | 2.28 | 18.98 | %O = 72.17 |
| 11 | CO ₂ - 5.14 | 5.14 | - | 10.28 | Σ = 28.14 |
| | H ₂ O - 1.66 | - | 3.32 | 1.66 | %C = 18.27 |
| | O ₂ - 3.87 | - | - | 7.74 | %H = 11.80 |
| | | 5.14 | 3.32 | 19.68 | %O = 69.94 |
| 12 | CO ₂ - 7.31 | 7.31 | - | 14.62 | Σ = 30.31 |
| | H ₂ O - 1.58 | - | 3.16 | 1.58 | %C = 24.12 |
| | O ₂ - 1.82 | - | - | 3.64 | %H = 10.43 |
| | | 7.31 | 3.16 | 19.84 | %O = 65.46 |
| 13 | CO ₂ - 6.91 | 6.91 | - | 13.82 | Σ = 30.16 |
| | H ₂ O - 1.45 | - | 2.90 | 1.45 | %C = 22.91 |
| | O ₂ - 2.54 | - | - | 5.08 | %H = 9.62 |
| | | 6.91 | 2.90 | 20.35 | %O = 67.47 |
| 14 | CO ₂ - 6.79 | 6.79 | - | 13.58 | Σ = 30.55 |
| | H ₂ O - 1.52 | - | 3.04 | 1.52 | %C = 22.23 |
| | O ₂ - 2.81 | - | - | 5.62 | %H = 9.95 |
| | | 6.79 | 3.04 | 20.72 | %O = 67.82 |

| N° de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje Atómico |
|---------------|-------------------------|------|------|-------|--|
| 15 | CO ₂ - 6.93 | 6.93 | - | 13.86 | Σ = 30.22 % C = 22.93 % H = 9.60 % O = 67.47 |
| | H ₂ O - 1.45 | - | 2.90 | 1.45 | |
| | O ₂ - 2.54 | - | - | 5.08 | |
| | | 6.93 | 2.90 | 20.39 | |
| 16 | CO ₂ - 6.20 | 6.20 | - | 12.40 | Σ = 37.48 % C = 16.54 % H = 21.45 % O = 62.01 |
| | H ₂ O - 4.02 | - | 8.04 | 4.02 | |
| | O ₂ - 3.41 | - | - | 6.82 | |
| | | 6.20 | 8.04 | 23.24 | |
| 17 | CO ₂ - 6.05 | 6.05 | - | 12.10 | Σ = 31.43 % C = 19.25 % H = 12.85 % O = 67.90 |
| | H ₂ O - 2.02 | - | 4.04 | 2.02 | |
| | O ₂ - 2.31 | - | - | 7.22 | |
| | | 6.05 | 4.04 | 21.34 | |
| 18 | CO ₂ - 6.33 | 6.33 | - | 12.66 | Σ = 35.52 % C = 17.82 % H = 19.20 % O = 62.98 |
| | H ₂ O - 3.41 | - | 6.82 | 3.41 | |
| | O ₂ - 3.15 | - | - | 6.30 | |
| | | 6.33 | 6.82 | 22.37 | |
| 19 | CO ₂ - 4.80 | 4.80 | - | 9.60 | Σ = 31.16 % C = 15.40 % H = 19.38 % O = 65.21 |
| | H ₂ O - 3.02 | - | 6.04 | 3.02 | |
| | O ₂ - 3.15 | - | - | 7.70 | |
| | | 4.80 | 6.04 | 20.32 | |
| 20 | CO ₂ - 5.00 | 5.00 | - | 10.00 | Σ = 26.76 % C = 18.68 % H = 10.01 % O = 71.30 |
| | H ₂ O - 1.34 | - | 2.68 | 1.34 | |
| | O ₂ - 3.87 | - | - | 7.74 | |
| | | 5.00 | 2.68 | 19.08 | |

| No. de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje Atómico |
|----------------|-------------------------|------|------|-------|---|
| 21 | CO ₂ - 5.52 | 5.52 | - | 11.04 | Σ = 30.45 %C = 18.13 %H = 13.46 %O = 68.41 |
| | H ₂ O - 2.05 | - | 4.10 | 2.05 | |
| | O ₂ - 3.87 | - | - | 7.74 | |
| | | 5.52 | 4.10 | 20.83 | |

TABLA VIII

Composición atómica promedio del gas resultante de la combustión completa.

| Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|-------------------------|------|------|-------|---|
| N ₂ - 88.45 | - | - | - | Σ = 31.24 %C = 19.11 %H = 14.02 %O = 66.87 |
| CO ₂ - 5.97 | 5.97 | - | 11.94 | |
| H ₂ O - 2.19 | - | 4.38 | 2.19 | |
| O ₂ - 3.38 | - | - | 6.76 | |
| | 5.97 | 4.38 | 20.89 | |

TABLA IX

Resultados obtenidos del análisis de los gases de combustión (en % peso), durante la combustión incompleta.

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso |
|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 1 | H ₂ | 0.30 | 2 | H ₂ | 0.40 |
| | CO ₂ | 8.41 | | CO ₂ | 7.45 |
| | H ₂ O | 1.39 | | H ₂ O | 1.05 |
| | CO | 5.00 | | CO | 6.00 |
| | N ₂ | 84.9 | | N ₂ | 85.10 |

| No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso | No. de muestra | Componentes | Porcentaje en peso |
|----------------|--|---|----------------|--|---|
| 3 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.40 8.46 1.02 5.00 85.12 | 4 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.30 9.89 1.07 2.50 86.24 |
| 5 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.40 8.42 0.82 5.00 85.36 | 6 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.50 8.11 0.78 5.20 85.41 |
| 7 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.50 8.58 0.90 4.60 85.42 | 8 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ C ₂ H ₆ | 0.50 8.71 1.12 4.55 84.837 2.83E-1 |
| 9 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ | 0.50 8.67 0.79 4.55 85.49 | 10 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ C ₂ H ₆ | 0.50 9.03 1.03 4.05 85.287 1.03E-1 |
| 11 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ CH ₄ | 0.46 8.24 0.82 4.46 85.30 0.72 | 12 | H ₂ CO ₂ H ₂ O CO N ₂ CH ₄ | 0.31 0.09 0.87 5.31 85.01 0.41 |

TABLA X

Composición del gas resultante de la combustión incompleta (en volumen)

| N° de Muestra | Componentes | Porcentaje en vol. | N° de muestra | componentes | Porcentaje en vol. |
|---------------|-------------------------------|--------------------|---------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | H ₂ | 4.13 | 2 | H ₂ | 5.43 |
| | CO ₂ | 5.27 | | CO ₂ | 4.60 |
| | H ₂ O | 2.13 | | H ₂ O | 1.58 |
| | CO | 4.92 | | CO | 5.82 |
| | N ₂ | 83.55 | | N ₂ | 82.56 |
| 3 | H ₂ | 5.45 | 4 | H ₂ | 4.16 |
| | CO ₂ | 5.24 | | CO ₂ | 6.24 |
| | H ₂ O | 1.55 | | H ₂ O | 1.65 |
| | CO | 4.87 | | CO | 2.48 |
| | N ₂ | 82.89 | | N ₂ | 85.47 |
| 5 | H ₂ | 5.46 | 6 | H ₂ | 6.73 |
| | CO ₂ | 5.22 | | CO ₂ | 4.96 |
| | H ₂ O | 1.24 | | H ₂ O | 1.17 |
| | CO | 4.87 | | CO | 5.00 |
| | N ₂ | 83.20 | | N ₂ | 82.14 |
| 7 | H ₂ | 6.74 | 9 | H ₂ | 6.74 |
| | CO ₂ | 5.26 | | CO ₂ | 5.32 |
| | H ₂ O | 1.35 | | H ₂ O | 1.18 |
| | CO | 4.43 | | CO | 4.38 |
| | N ₂ | 82.23 | | N ₂ | 82.37 |
| 8 | H ₂ | 6.73 | 10 | H ₂ | 6.74 |
| | CO ₂ | 5.33 | | CO ₂ | 5.54 |
| | H ₂ O | 1.68 | | H ₂ O | 1.54 |
| | N ₂ | 81.62 | | N ₂ | 82.18 |
| | C ₂ H ₆ | 0.25 | | C ₂ H ₆ | 0.09 |
| 11 | H ₂ | 6.19 | 12 | H ₂ | 4.26 |
| | CO ₂ | 5.04 | | CO ₂ | 5.05 |
| | H ₂ O | 1.23 | | H ₂ O | 1.35 |
| | CO | 4.29 | | CO | 5.21 |
| | N ₂ | 82.04 | | N ₂ | 83.44 |
| | CH ₄ | 1.21 | | CH ₄ | 0.70 |

TABLA XI

Composición atómica del gas resultante en un diagrama ternario C-H-O durante la combustión incompleta.

| N° de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------|-------------------------|-------|-------|-------|------------------------|
| 1 | H ₂ - 4.13 | - | 8.26 | - | $\Sigma = 40.30$ |
| | CO ₂ - 5.27 | 5.27 | - | 10.54 | %C= 25.29 |
| | H ₂ O - 2.13 | - | 4.26 | 2.13 | %H ₂ =31.07 |
| | total | 10.19 | 12.57 | 17.59 | %O= 43.65 |
| 2 | H ₂ - 5.43 | - | 10.86 | - | $\Sigma = 41.04$ |
| | CO ₂ - 4.60 | 4.60 | - | 9.20 | %C= 25.39 |
| | H ₂ O - 1.58 | - | 3.16 | 1.58 | %H= 34.16 |
| | Total | 10.42 | 14.02 | 16.60 | %O= 40.45 |
| 3 | H ₂ - 5.45 | - | 10.90 | - | $\Sigma = 41.01$ |
| | CO ₂ - 5.24 | 5.24 | - | 10.48 | %C= 24.65 |
| | H ₂ O - 1.55 | - | 3.10 | 1.55 | %H= 34.14 |
| | CO - 4.87 | 4.87 | - | 4.87 | %O= 41.21 |
| 4 | H ₂ - 4.16 | - | 8.32 | - | $\Sigma = 36.95$ |
| | CO ₂ - 6.24 | 6.24 | - | 12.48 | %C= 23.60 |
| | H ₂ O - 1.65 | - | 3.30 | 1.65 | %H= 31.45 |
| | CO - 2.48 | 2.48 | - | 2.48 | %O= 44.95 |
| 5 | H ₂ - 5.46 | - | 10.92 | - | $\Sigma = 39.82$ |
| | CO ₂ - 5.22 | 5.22 | - | 10.44 | %C = 25.34 |
| | H ₂ O - 1.24 | - | 2.48 | 1.24 | %H= 33.65 |
| | CO - 4.87 | 4.87 | - | 4.87 | %O= 41.01 |
| 6 | H ₂ - 6.73 | - | 13.46 | - | $\Sigma = 41.85$ |
| | CO ₂ - 4.96 | 4.96 | - | 9.92 | %C= 23.80 |
| | H ₂ D - 1.17 | - | 2.34 | 1.17 | %H= 37.75 |
| | CD - 5.00 | 5.00 | - | 5.00 | %O= 38.45 |
| Total | 9.96 | 15.80 | 16.09 | | |

| N° de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------|--------------------------------------|-------|-------|------------------------|--------------------|
| 7 | H ₂ - 6.74 | - | 13.48 | - | Σ = 42.17 |
| | CO ₂ - 5.26 | 5.26 | - | 10.52 | |
| | H ₂ O - 1.35 | - | 2.70 | 1.35 | %C= 22.98 |
| | CO - 4.43 | 4.43 | - | 4.43 | %H= 38.37 |
| | Total | 9.69 | 16,18 | 16.30 | %O= 38.65 |
| 8 | H ₂ - 6.73 | - | 13.46 | - | Σ = 45.25 |
| | CO ₂ - 5.33 | 5.33 | - | 10.66 | |
| | H ₂ O - 1.68 | - | 3.36 | 1.68 | %C= 22.56 |
| | CO - 4.38 | 4.38 | - | 4.38 | |
| | C ₂ H ₆ - 0.25 | 0.50 | 1.50 | - | %H= 40.49 |
| Total | 10.21 | 18.32 | 16.72 | %O= 36.95 | |
| 9 | H ₂ - 6.74 | - | 13.48 | - | Σ = 41.47 |
| | CO ₂ - 5.32 | 5.32 | - | 10.64 | |
| | H ₂ O - 1.18 | - | 2.36 | 1.18 | %C= 23.24 |
| | CO - 4.38 | 4.38 | - | 4.38 | %H= 37.95 |
| | Total | 9.70 | 15.84 | 16.20 | %O= 38.81 |
| 10 | H ₂ - 6.74 | - | 13.48 | - | Σ = 43.24 |
| | CO ₂ - 5.54 | 5.54 | - | 11.08 | |
| | H ₂ O - 1.54 | - | 3.08 | 1.54 | %C= 22.25 |
| | CO - 3.90 | 3.90 | - | 3.90 | |
| | C ₂ H ₆ - 0.09 | 0.18 | 0.54 | - | %H= 39.55 |
| Total | 9.62 | 17.10 | 16,52 | %O= 38.21 | |
| 11 | H ₂ - 6.19 | - | 12.38 | - | Σ = 45.82 |
| | CO ₂ - 5.04 | 5.04 | - | 10.08 | |
| | H ₂ O - 1.23 | - | 2.46 | 1.23 | %C= 23.00 |
| | CO - 4.29 | 4.29 | - | 4.29 | |
| | CH ₄ - 1.21 | 1.21 | 4.84 | - | %H= 42.95 |
| Total | 10.54 | 19.68 | 15.60 | %O= 34.05 %O= 38.45 | |

| N° de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------|-------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 12 | H ₂ - 4.26 | - | 8.52 | - | $\Sigma = 41.58$ |
| | CO ₂ - 5.05 | 5.05 | - | 10.10 | |
| | H ₂ O - 1.33 | - | 2.66 | 1.33 | $\%C = 26.36$ |
| | CO - 5.21 | 5.21 | - | 5.21 | $\%H = 33.62$ |
| | CH ₄ - 0.70 | 0.70 | 2.80 | - | |
| | Total | 10.96 | 13.98 | 16.64 | $\%O = 40.02$ |

TABLA XII

Composición atómica promedio del gas resultante de la combustión incompleta en un diagrama ternario C-H-O

| N° de muestra | Componentes | C | H | O | Porcentaje atómico |
|---------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| | N ₂ - 82.81 | - | - | - | $\Sigma = 41.79$ |
| | CO ₂ - 5.26 | 5.26 | - | 10.52 | |
| | H ₂ O - 1.47 | - | - | - | |
| | CO - 4.55 | 4.55 | 2.94 | 1.47 | $\%C = 24.00$ |
| | H ₂ - 5.73 | - | - | 4.55 | $\%H = 36.42$ |
| | CH ₄ - 0.16 | 0.16 | 11.46 | - | $\%O = 39.58$ |
| | C ₂ H ₆ - 0.03 | 0.06 | 0.64 | - | |
| | Total | 10.03 | 0.18 | 16.54 | |

TABLA XIII

| Tiempo de Permanencia | %K | %Mg | %Fe | %Na | %Ca | %Mn | %Si | %Cu | %Al | (% Al ₂ O ₃) | | %N ₂ | | %F ₂ | |
|-----------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------------------------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | | | | | | | | | | ALMEXA | CHOPO | ALMEXA | CHOPO | ALMEXA | CHOPO |
| 2.50 | 0.0046 | 0.01 | 0.60 | 0.024 | 0.0013 | 0.005 | 0.305 | 0.021 | 60.00 | 13.90 | 25.49 | 0.061 | 0.68 | 0.44 | 0.072 |
| 2.58 | 0.0071 | 0.051 | 0.36 | 0.142 | 0.0016 | 0.01 | 0.021 | 0.033 | 37.00 | 30.95 | 16.31 | 0.018 | 4.59 | 0.36 | 0.228 |
| 2.83 | 0.007 | 0.0125 | 0.02 | 0.047 | 0.001 | 0.001 | 0.03 | 0.0305 | 18.80 | 27.85 | 23.45 | 0.28 | 0.84 | 0.10 | 0.005 |
| 3.08 | 0.013 | 0.0366 | 0.70 | 0.066 | 0.0017 | 0.025 | 0.007 | 0.031 | 46.00 | 26.79 | 10.44 | 0.37 | 0.99 | 0.76 | 0.10 |
| 3.25 | 1.826 | 0.22 | 0.77 | 0.422 | 0.001 | 0.015 | 0.026 | 0.033 | 30.00 | 30.23 | 22.43 | 0.97 | 0.53 | 2.80 | 0.283 |
| 3.50 | 0.038 | 1.43 | 1.222 | 0.0486 | 0.0014 | 0.024 | 0.001 | 0.0172 | 44.86 | 25.83 | 18.08 | 0.092 | 2.10 | 0.23 | 0.01 |
| 4.33 | 0.0016 | 0.0091 | 0.10 | 0.051 | 0.001 | 0.0025 | 0.0115 | 0.017 | 8.1 | 37.50 | 23.24 | 0.074 | 2.41 | 0.22 | 0.29 |
| 4.42 | 0.011 | 0.0201 | 0.45 | 0.043 | 0.001 | 0.01 | 0.0105 | 0.011 | 45.00 | 25.47 | 20.59 | 0.27 | 0.34 | 0.19 | 0.005 |
| 6.00 | 0.008 | 0.024 | 1.05 | 0.07 | 0.0014 | 0.032 | 0.016 | 0.0334 | 50.80 | 26.89 | 19.16 | 1.09 | 0.76 | 0.67 | 0.034 |
| 6.00 | 0.005 | 0.005 | 0.014 | 0.038 | 0.001 | 0.004 | 0.015 | 0.016 | 18.50 | 23'10 | 20.52 | 0.048 | 2.12 | 0.25 | 0.33 |
| 7.50 | 0.014 | 0.042 | 0.45 | 0.111 | 0.0024 | 0.005 | 0.0165 | 0.013 | 12.50 | 26.40 | 22.22 | 0.012 | 4.20 | 0.33 | 0.22 |
| 7.75 | 0.001 | 0.025 | 0.35 | 0.058 | 0.0018 | 0.005 | 0.010 | 0.031 | 51.00 | 40.97 | 26.10 | 0.15 | 0.88 | 0.16 | 0.25 |
| 8.75 | 0.0465 | 0.05 | 1.06 | 0.076 | 0.016 | 0.018 | 0.0155 | 0.0105 | 36.00 | 42.40 | 21.18 | 1.01 | 3.44 | 0.10 | 0.178 |
| 9.25 | 0.143 | 0.488 | 1.16 | 0.227 | 0.0016 | 0.0022 | 0.005 | 0.0225 | 36.00 | 42.05 | 20.59 | 0.026 | 2.21 | 0.27 | 0.32 |

NOTA: El análisis realizado en ALMEXA para determinar los contenidos de N₂ y F₂ fue escoria de diversos mallajes. (-200 y + 250). Mientras que el de CHOPO fue utilizada escoria de malla (-300).

TABLA XIV

Temperaturas de la Atmosfera

a) Período de combustión completa

| Número de muestreo | Temperatura en grados centígrados | | | |
|--------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| | Puerta 1 | Puerta 2 | Puerta 3 | Puerta 4 |
| 1 | 920 | 1115 | 1120 | 1200 |
| 2 | 972 | 1055 | 1140 | 1200 |
| 3 | 998 | 1069.5 | 1102 | 1115.5 |
| 4 | 1043.5 | 1122.25 | 1162.25 | 1196 |
| 5 | 1095.75 | 1122.25 | 1149 | 1200 |
| 6 | 1005 | 1017.5 | 1109 | 1147 |
| 7 | 1005 | 1031 | 1044 | 1129 |
| 8 | 1109 | 1169 | 1187 | 1200 |

b) Período de combustión incompleta

| Número de muestreo | Temperatura en grados centígrados | | | |
|--------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| | Puerta 1 | Puerta 2 | Puerta 3 | Puerta 4 |
| 1 | 892 | 954 | 1004 | 1096 |
| 2 | 830 | 842 | 854 | 884 |
| 3 | 794.5 | 923.5 | 999.25 | 1005.5 |
| 4 | 746 | 808 | 864 | 896 |
| 5 | 896 | 958 | 982 | 1076 |
| 6 | 919 | 979 | 1060 | 1096 |
| 7 | 741 | 776 | 986 | 1100 |
| 8 | 792 | 825 | 865 | 1055 |
| 9 | 831 | 894 | 952 | 987 |

NOTA: La puerta 1 está al lado de la chimenea y la 4 junto a los quemadores

TABLA XV

| Temperatura (K) | K ₁ | K ₂ | K ₃ | K ₄ |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 298 | 1.2416302 E-9 | 6.6859972 E-17 | 4.3213.604 | 1.5471973 E-21 |
| 350 | 1.2055791 E-7 | 2.1576863 E-13 | 4.994.3809 | 4.3202278 E-17 |
| 400 | 3.3575112 E-6 | 7.0391389 E-11 | 1064.5495 | 6.612317 E-14 |
| 450 | 4.6340436 E-5 | 6.3458275 E-9 | 319.91261 | 1.9836128 E-11 |
| 500 | 3.898172 E-4 | 2.3252157 E-7 | 122.27108 | 1.901689 E-9 |
| 550 | 2.2813228 E-3 | 4.4266904 E-6 | 55.662536 | 7.9527285 E-8 |
| 600 | 0.0101495 | 5.157395 E-5 | 28.890985 | 1.7851034 E-6 |
| 650 | 0.036512 | 4.1183095 E-4 | 16.587357 | 2.4828003 E-5 |
| 700 | 0.1110181 | 2.4440676 E-3 | 10.309046 | 2.3707989 E-4 |
| 750 | 0.2947808 | 0.011439 | 6.8265448 | 1.6756652 E-3 |
| 800 | 0.7005517 | 0.0441447 | 4.7594919 | 9.275092 E-3 |
| 850 | 1.5185551 | 0.1453351 | 3.462171 | 0.0419978 |
| 900 | 3.0471292 | 0.4191439 | 2.6091157 | 0.1606459 |
| 950 | 5.7268395 | 1.0812735 | 2.0256774 | 0.5337836 |
| 1000 | 10.176494 | 2.5371765 | 1.6130192 | 1.5729362 |
| 1050 | 17.229462 | 5.4889361 | 1.3125951 | 4.1817437 |
| 1073.15 | 21.667666 | 7.6573755 | 1.2009173 | 6.3762724 |
| 1100 | 27.96885 | 11.07028 | 1.08832264 | 10.171839 |
| 1123.15 | 34.558118 | 14.998014 | 1.0035473 | 14.944999 |
| 1150 | 43.760313 | 21.005644 | 0.9171984 | 22.90196 |
| 1173.5 | 53.236992 | 27.739666 | 0.8515482 | 32.575565 |
| 1200 | 66.281593 | 37.786086 | 0.7840772 | 48.191793 |
| 1250 | 97.548148 | 64.852715 | 0.6787388 | 95.54548851 |
| 1300 | 139.93451 | 106.7772 | 0.5941091 | 179.72657 |
| 1350 | 196.19124 | 169.42916 | 0.525187 | 322.60728 |
| 1400 | 269.45756 | 260.12114 | 0.4683676 | 555.3781 |
| 1450 | 363.26972 | 387.72396 | 0.4210069 | 920.94432 |
| 1500 | 481.565289 | 562.74695 | 0.3811343 | 1476.5053 |

TABLA XVI

constantes de mezcla : O/H.

| O/H | α | β |
|-----------|----------|----------|
| .0263157 | .0292529 | .020747 |
| .0555555 | .0585058 | .0414941 |
| .0882352 | .0877587 | .0414941 |
| .0882352 | .0877587 | .0622412 |
| .125 | .1170117 | .0829882 |
| .1666667 | .1462646 | .1037353 |
| .2142857 | .1755175 | .1244824 |
| .2692307 | .2047705 | .1452294 |
| .3264462 | .1698274 | .2257725 |
| .3333333 | .2340234 | .1659765 |
| .4090909 | .2632763 | .1867236 |
| .5 | .2925293 | .2074707 |
| .6111111 | .3217822 | .2282177 |
| .75 | .3510351 | .2489648 |
| .9285714 | .380288 | .2697119 |
| 1.0151515 | .180918 | .4890819 |
| 1.1666667 | .409541 | .2904589 |
| 1.5 | .4387939 | .311206 |
| 2.0 | .4580468 | .3319531 |
| 2.8333333 | .4972998 | .3527001 |
| 4.5 | .5265527 | .3734472 |
| 9.5 | .5558056 | .3941943 |

TABLA XVII

| Temperatura (K) | 0/H | A | B | C | D | E |
|-----------------|-----------|-------------|------------|--------------|--------------|------------|
| 1073.15 | .0263157 | - 13.103666 | 792.70248 | 2,836.9234 | -26,381.297 | 32,138.509 |
| | .0555555 | " | " | 2,883,2663 | -25,413.877 | 29,824.642 |
| | .0882352 | " | " | 2,929.5272 | -24,446.455 | 27,297.212 |
| | .125 | " | " | 2,975.9519 | -23,479.035 | 25,456.22 |
| | .1666667 | " | " | 3,018.8986 | -22,511.615 | 23,401.661 |
| | .2142857 | " | " | 3,068,6375 | -21,544.192 | 21,433.539 |
| | .2692307 | " | " | 3,114.9803 | -20,576.773 | 19,551.855 |
| | .3264462 | " | " | 3,197.6102 | -18,851.848 | 16,411.234 |
| | .3333333 | " | " | 3,161.3231 | -19,609.353 | 17,256.604 |
| | .4090909 | " | " | 3,207.6659 | -18,641.93 | 16,047.789 |
| | .5 | " | " | 3,254.0088 | -17,674.508 | 14,425.408 |
| | .6111111 | " | " | 3,300.3515 | -16,707.091 | 12,889.469 |
| | .75 | " | " | 3,346.6944 | -15,739.668 | 11,439.962 |
| | .9285714 | " | " | 3,393.0372 | -14,772.166 | 10,076.891 |
| | 1.0151515 | " | " | 3,549.8363 | -11,499.017 | 6,105.972 |
| | 1.1666667 | " | " | 3,439.3799 | -13,804.828 | 8,800.2579 |
| | 1.5 | " | " | 3,485.7228 | -12,837.406 | 7,610.0587 |
| 2.0 | " | " | 3,522.0656 | -11,869.986 | 6,506.2955 | |
| 2.8333333 | " | " | 3,578.4084 | -10,902.566 | 5,488.9697 | |
| 4.5 | " | " | 3,618.3751 | - 9,935.1434 | 4,558.0784 | |
| 9.5 | " | " | 3,671.0962 | - 8,830.98 | 3,913.6230 | |
| 1123.15 | .0263157 | -17.819637 | 1,930.3705 | 12,230323 | -104,158.24 | 133,807.41 |
| | .5555555 | " | " | 12,355.729 | -100,338.68 | 124,173.72 |
| | .882352 | " | " | 12,481.136 | - 96,519.12 | 114,899.9 |
| | .125 | " | " | 12,606.543 | - 92,699.568 | 105,985.97 |
| | .1666667 | " | " | 12,723.31 | - 88,880.015 | 97,431.895 |

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

| | | | | | | |
|---------|-----------|------------|-----------|-------------|--------------|------------|
| | .2142857 | -"- | -"- | 12,857.356 | - 85,060.452 | 89,237.693 |
| | .2692307 | -"- | -"- | 12,982.763 | - 81,240.9 | 81,403.376 |
| | .3264462 | -"- | -"- | 13,206.365 | - 74,430.579 | 68,327.527 |
| | .3333333 | -"- | -"- | 13,108.169 | - 77,421.348 | 73,928.92 |
| | .4090909 | -"- | -"- | 13,233.576 | - 73,601.785 | 66,814.337 |
| | .5 | -"- | -"- | 13,358.983 | - 69,782.222 | 60,059.617 |
| | .6111111 | -"- | -"- | 13,484.39 | - 65,962.68 | 53,664.797 |
| | .75 | -"- | -"- | 13,609.796 | - 62,143.117 | 47,629.832 |
| | .9285714 | -"- | -"- | 13,735.203 | - 58,323.241 | 41,954.739 |
| | 1.0151515 | -"- | -"- | 14,159.512 | - 45,401.243 | 25,421.974 |
| | 1.1666667 | -"- | -"- | 13,860.61 | - 54,504.012 | 36,639.527 |
| | 1.5 | -"- | -"- | 13,986.017 | - 50,684.449 | 31,684.18 |
| | 2.0 | -"- | -"- | 14,111.423 | - 46,864.897 | 27,088.705 |
| | 2.8333333 | -"- | -"- | 14,236.83 | - 43,045.345 | 22,853.109 |
| | 4.5 | -"- | -"- | 14,362.237 | - 39,225.782 | 18,977.38 |
| | 9.5 | -"- | -"- | 14,487.644 | - 34,866.341 | 16,418.958 |
| 1173,15 | .0263157 | -23,974667 | 4272.6401 | 41,135.164 | -364,962.17 | 498,363.11 |
| | .0555555 | -"- | -"- | 41,445,886 | -351,518.76 | 462,482.61 |
| | .0882352 | -"- | -"- | 41,756.6608 | -338,195.32 | 427,942.46 |
| | .125 | -"- | -"- | 42,074,694 | -324,811.91 | 394,742.68 |
| | .1666667 | -"- | -"- | 42,357,551 | -311,428.5 | 362,883.2 |
| | .2142857 | -"- | -"- | 42,668.775 | -298,045.06 | 332,364.06 |
| | .2692307 | -"- | -"- | 42,999,497 | -284,661.65 | 303,185.29 |
| | .3264462 | -"- | -"- | 43,553.519 | -260,798.83 | 254,484.55 |
| | .3333333 | -"- | -"- | 43,310.219 | -271,278.24 | 275,346.83 |
| | .4090909 | -"- | -"- | 43,620.942 | -257,894.8 | 248,848.7 |
| | .5 | -"- | -"- | 43,931.664 | -244,511.35 | 223,690.88 |

| | | | | | |
|-----------|----|----|------------|-------------|------------|
| .6111111 | -" | -" | 44,242.386 | -231,127.98 | 199,873.49 |
| .75 | -" | -" | 44,553.108 | -217,744.54 | 177,396.38 |
| .9285714 | -" | -" | 44,863.831 | -204,360 | 156,259.61 |
| 1.0151515 | -" | -" | 45,915.147 | -159,078.84 | 94,683.648 |
| 1.1666667 | -" | -" | 45,174.552 | -190,977.72 | 136,463.21 |
| 1.5 | -" | -" | 45,485.175 | -177,594.28 | 118,007.11 |
| 2.0 | -" | -" | 45,795.997 | -164,210.87 | 100,891.36 |
| 2.8333333 | -" | -" | 45,106.719 | -150,827.46 | 85,115.961 |
| 4.5 | -" | -" | 46,377.2 | -137,444.02 | 70,680.882 |
| 9.5 | -" | -" | 46,728.165 | -122,168.88 | 57,586.142 |

TABLA XVIII

| O/H | Temperatura (K) | A | B | C | D | E |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| .3264462 | 298 | -4.9434067 E-9 | -1.5129466 E-18 | 1.1278537 E-18 | -2.4562675 E-29 | 1.6931489 E-29 |
| | 350 | -4.7362059 E-7 | -1.3494926 E-14 | 9.5732496 E-15 | -8.6366756 E-23 | 5.9536777 E-23 |
| | 400 | -1.2830564 E-5 | -9.2605902 E-12 | 5.7615978 E-12 | -4.6572043 E-18 | 3.2110293 E-18 |
| | 450 | -1.6912086 E-4 | -1.3954146 E-9 | 3.8859749 E-10 | -2.4021897 E-14 | 1.6571575 E-14 |
| | 500 | -1.3318235 E-3 | -6.3476638 E-8 | -7.1528347 E-9 | -2.3775358 E-11 | 1.6422226 E-11 |
| | 550 | -7.1540847 E-3 | -7.2677278 E-7 | -2.2560047 E-6 | -7.0399183 E-9 | 4.8746064 E-9 |
| | 600 | -0.0286779 | 1.6923303 E-5 | -8.8481568 E-5 | -8.3909267 E-7 | 5.8344685 E-7 |
| | 650 | -0.0913985 | 6.3216271 E-4 | -1.7236803 E-3 | -4.9462833 E-5 | 3.4617153 E-5 |
| | 700 | -0.2425043 | 9.5100111 E-3 | -0.0209263 | -1.6709542 E-3 | 1.1804381 E-3 |
| | 750 | -0.5544124 | 9.0513025 E-2 | -0.1754986 | -3.6048831 E-2 | 2.5793562 E-2 |

| | | | | | | |
|-----------|---------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | 800 | -1.1213561 | 6.2489887 E-1 | -1.0671614 | -5.3875774 E-1 | 3.9196156 E-1 |
| | 850 | -2.0488207 | 3.365383 | -4.6955166 | -5.9365925 | 4.410665 |
| | 900 | -3.4397574 | 14.819233 | -13.30487 | -50.629203 | 38.597765 |
| | 950 | -5.3848677 | 55.16724 | -5.000018 | -347.24549 | 273.06108 |
| | 1000 | -7.9658607 | 177.97943 | 203.98896 | -1.9740494 | 1.611.0555 |
| | 1050 | -11.279843 | 507.07462 | 1,503.887 | -9.5478674 | 8.129.9201 |
| | 1073.15 | -13.103666 | 792.70248 | 3,197.6102 | -18,851.848 | 16,411.234 |
| | 1100 | -15.490776 | 1,294.2645 | 7,065.486 | -40,033.903 | 35,825.39 |
| | 1123.15 | -17.82274 | 1,930.2639 | 13,206.365 | -74,430.579 | 68,327.527 |
| | 1150 | -20.910507 | 2,991.4175 | 25,850.105 | -147,999.01 | 140,243.93 |
| | 1173.15 | -23.974667 | 4,272.6401 | 43,553.52 | 260,798.83 | 254,484.55 |
| | 1200 | -28.108704 | 6,307.6151 | 75,984.34 | 488,909.84 | 494,766.79 |
| | 1250 | -38.64816 | 12,182.871 | 180,453.33 | 1'459,035.9 | 1'592,892.4 |
| | 1300 | -52.23959 | 21,551.249 | 310,463.79 | 3'967,631.3 | 4'721,916.8 |
| | 1350 | -72.909022 | 34,687.863 | 165,122.47 | 9'896,514.3 | 13'019,229 |
| | 1400 | -103.17173 | 49,838.513 | -1'501,949.6 | -22'743,199 | 33'625,378 |
| | 1450 | -147.20338 | 60,723.452 | -8'637,585.5 | -48'250,493 | 81'883,105 |
| | 1500 | -210.40624 | 52,393.179 | -31'988,499 | -94'373,019 | 1,890 7171 E+8 |
| 1.0151515 | 298 | -4.9434067 E-9 | -1.5129466 E-18 | -5.1462913 E-19 | -1.4982501 E-30 | 6.2995382 E-30 |
| | 350 | -4.7361059 E-7 | -1.349926 E-14 | -5.4982521 E-15 | -5.2680925 E-23 | 2.2151283 E-23 |
| | 400 | -1.2830564 E-5 | -9.2605902 E-12 | -5.27991887E-12 | -2.8407439 E-18 | 1.1946972 E-18 |
| | 450 | -1.6912086 E-4 | -1.3934146 E-9 | -1.3161103 E-9 | -1.4652579 E-14 | 6.1656285 E-15 |
| | 500 | -1.3318235 E-3 | -6.3476638 E-8 | -1.2289629 E-7 | -1.4502199 E-11 | 6.1100745 E-12 |
| | 550 | -7.1540847 E-3 | -7.2767278 E-1 | -5.4348938 E-6 | -4.2941222 E-9 | 1.8136485 E-9 |
| | 600 | -0.0286779 | 1.6923303 E-5 | -1.3420954 E-4 | -5.1181936 E-7 | 2.1707753 E-7 |
| | 650 | -0.0913985 | 6.3216271 E-4 | -2.0844241 E-3 | -3.0170727 E-5 | 1.2879675 E-5 |
| | 700 | -0.2425043 | 9.5100111 E-3 | -0.0221482 | -1.019228 E-3 | 4.3919438 E-4 |
| | 750 | -0.5544124 | 9.0513025 E-2 | -0.1699272 | -2.198862 E-2 | 9.5967657 E-2 |
| | 800 | -1.1213561 | 6.2489887 E-1 | -0.9617825 | -3.2862478 E-1 | 0.1458334 |
| | 850 | -2.0488207 | 3.365383 | -3.8885373 | -3.6211292 | 1.6410342 |
| | 900 | -3.4397574 | 14.819233 | -8.9555498 | -30.882174 | 14.360704 |
| | 950 | -5.3848677 | 55.16724 | 13.388147 | -211.8085 | 101.59524 |
| | 1000 | -7.9658607 | 177.97943 | 271.77128 | -1,204.6552 | 599.41013 |
| | 1050 | -11.279843 | 507.07462 | 1,718.5683 | -5,823.89 | 3,024.8224 |
| | 1073.15 | -13.103666 | 792.70248 | 3,549.8384 | -11,499.017 | 6,105.972 |
| | 1100 | -15.490776 | 1,294.2645 | 7,673.7719 | -24,419.384 | 13,329.212 |
| | 1123.15 | -17.819657 | 1,930.2639 | 14,159.512 | -45,400.244 | 25,422.974 |
| | 1150 | -20.910507 | 2,991.4175 | 27,282.567 | -27,282.567 | 90,274.601 |
| | 1173.15 | -23.974667 | 4,272.6401 | 45,915.148 | -159,078.84 | 94,683.648 |
| | 1200 | -28.108704 | 6,307.6151 | 79,787.216 | -298,219.18 | 184,083.18 |
| | 1250 | -38.64816 | 12,192.871 | 188,690.91 | -889,964.64 | 592,388.19 |
| | 1300 | -52.23959 | 21,551.249 | 327,591.97 | -2'420,126.6 | 1'756,838.7 |
| | 1350 | -72.909022 | 34,687.863 | 198,824.97 | -6'036,553.3 | 4'343,941 |
| | 1400 | -103.17173 | 49,838.513 | -1'438,814.8 | -13'972,615 | 12'310,675 |
| | 1450 | -147.20338 | 60,723.452 | -8'524,421.7 | -29'431,232 | 30'465,469 |
| | 1500 | -210.40624 | 52,393.179 | -31'793,586 | -57'564,486 | 70'346,115 |

TABLE XIX

| O/H | Temperatura | Z | α | β | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 |
|---------|---------------|-------------------|-----------|-----------|--------------|----------------|-----------|----------------|
| .326462 | 298 | 1.55654934133 E-5 | .1698274 | .2257725 | 1.241630 E-9 | 6.6859972 E-17 | 43213.604 | 1.5471973 E-24 |
| | 350 | 1.58734791883 E-4 | | | 1.2055791E-7 | 2.1576863 E-13 | 4994.3809 | 4.3202278 E-17 |
| | 400 | 8.78708065296 E-4 | | | 3.3575112E-6 | 7.0391389 E-11 | 1064.5495 | 6.612317 E-14 |
| | 450 | 3.4278187446 E-3 | | | 4.6340436E-5 | 6.3458275 E-9 | 319.91261 | 1.9836128 E-11 |
| | 500 | 1.0359267949 E-2 | | | 3.898172 E-4 | 2.3252151 E-7 | 122.27108 | 1.901689 E-9 |
| | 550 | 2.58145676185 E-2 | | | 2.2813228E-3 | 4.4266904 E-6 | 55.662536 | 7.9527285 E-8 |
| | 600 | 5.5337772427 E-2 | | | 0.0101495 | 5.1573395 E-5 | 28.890985 | 1.7851-34 E-6 |
| | 650 | 0.105102539063 | | | 0.036512 | 4.1183095 E-4 | 16.587357 | 2.4828003 E-5 |
| | 700 | 0.1817578125 | | | 0.1110181 | 2.4440678 E-3 | 10.309046 | 2.3707989 E-4 |
| | 750 | 0.283192634583 | | | 0.2947808 | 0.011439 | 6.8265458 | 1.6756652 E-3 |
| | 800 | 0.412170767784 | | | 0.7005517 | 0.0441447 | 4.7594919 | 9.275092 E-3 |
| | 850 | 0.560336139053 | | | 1.5185551 | 0.1453351 | 3.462171 | 0.041978 |
| | 900 | 0.717193484306 | | | 3.0471292 | 0.4191439 | 2.6091257 | 0.1606459 |
| | 950 | 0.870769471396 | | | 5.7268392 | 1.0812735 | 2.0256774 | 0.5337836 |
| | 1000 | 1.00955184025 | | | 10.176494 | 2.5371765 | 1.6130192 | 1.5729363 |
| | 1050 | 1.12401773538 | | | 17.229462 | 5.4889361 | 1.3125951 | 4.1817437 |
| | 1073.15 | 1.16717918382 | | | 21.667666 | 7.6573755 | 1.2009173 | 6.3762724 |
| | 1100 | 1.2093440867 | | | 27.96885 | 11.07028 | 1.0883264 | 10.171839 |
| | 1123.15 | 1.23932774991 | | | 34.558118 | 14.998014 | 1.0035473 | 14.944999 |
| | 1150 | 1.27076450869 | | | 43.760313 | 21.005644 | 0.9171984 | 22.90196 |
| 1173.15 | 1.28715328339 | 53.236992 | 27.739666 | 0.8515482 | 32.575565 | | | |
| 1200 | 1.30530744449 | 66.281593 | 37.786086 | 0.7840772 | 48.191793 | | | |
| 1250 | 1.32935660563 | 97.548148 | 64.852715 | 0.6787388 | 95.548851 | | | |
| 1300 | 1.34478637357 | 139.93451 | 106.7772 | 0.5941091 | 179.72657 | | | |
| 1350 | 1.35485659795 | 196.19124 | 169.42916 | 0.525187 | 322.60728 | | | |
| 1400 | 1.36156787651 | 269.45756 | 260.12114 | 0.4683676 | 555.3781 | | | |

| | | | | | | | | |
|-----------|---------|-------------------|---------|----------|---------------|----------------|-----------|----------------|
| | 1450 | 1.36613763314 | | | 363,26977 | 387,72396 | 0.4210069 | 920,94432 |
| | 1500 | 1.36981450226 | | | 481,56589 | 562,74695 | 0,3811343 | 1476,5053 |
| 1.0151515 | 298 | 3.32637864631 E-6 | .180918 | .4890819 | 1.2416302 E-9 | 6,685 9972E-11 | 43213,604 | 1.5471973 E-21 |
| | 350 | 5.62580019031 E-5 | | | 1.2055791 E-7 | 2,1576863 E-13 | 4994,3809 | 4,3202278 E-17 |
| | 400 | 4.0283203125 E-4 | | | 3,3575112 E-6 | 7.0391389 E-11 | 1064,5495 | 6,612317 E-14 |
| | 450 | 1.81045755744 E-3 | | | 4,6340436 E-5 | 6,3458275 E-9 | 319,91261 | 1.9836128 E-11 |
| | 500 | 5.94629691793 E-3 | | | 3,898172 E-4 | 2.3252157 E-7 | 122,47108 | 1.901689 E-9 |
| | 550 | 1.55914022944 E-2 | | | 2,2813228 E-3 | 4,4266904 E-6 | 55,662536 | 7,9527285 E-8 |
| | 600 | 3.44822388916 E-2 | | | 0.0101495 | 5,1573395 E-5 | 28,890985 | 1.7851034 E-6 |
| | 650 | 6.6650390625 E-2 | | | 0.036512 | 4,1183095 E-4 | 16,587357 | 2,4828003 E-5 |
| | 700 | .11515045166 | | | 0.1110181 | 2,4440676 E-3 | 10,309046 | 2,3707989 E-4 |
| | 750 | .180902481079 | | | 0.2947808 | 0.011439 | 6,8265443 | 1.6756652 E-3 |
| | 800 | .261576533318 | | | 0.7005517 | 0.0441447 | 4,7594919 | 9,275092 E-3 |
| | 850 | .351984634995 | | | 1.5185551 | 0.1453351 | 3,462171 | 0.041978 |
| | 900 | .445502808318 | | | 3.0471292 | 0.4191439 | 2,6091157 | 0.1606459 |
| | 950 | .535758711398 | | | 5,7268395 | 1.0812735 | 2,0256774 | 0.5337836 |
| | 1000 | .617369053653 | | | 10,176494 | 2,5371765 | 1.6130192 | 1.5729363 |
| | 1050 | .685850098535 | | | 17,229462 | 5,4889361 | 1.3125951 | 4,1817437 |
| | 1073.15 | .712189280981 | | | 21,667666 | 7,6573755 | 1.2009173 | 6,3762724 |
| | 1100 | .738255510861 | | | 27,96885 | 11,07028 | 1.0883264 | 10,171839 |
| | 1123.15 | .75702788775 | | | 34,558118 | 14,998014 | 1,0035473 | 14,944999 |
| | 1150 | .774716629916 | | | 43,760313 | 21,005644 | 0.9171984 | 22,90196 |
| | 1173.15 | .787006257461 | | | 53,236992 | 27,739666 | 0.8515482 | 32,575565 |
| | 1200 | .798352798607 | | | 66,281593 | 37,786086 | 0.7840772 | 48,191793 |
| | 1250 | .813171436488 | | | 97,548148 | 64,852715 | 0.6787388 | 95,548821 |
| | 1300 | .822429303447 | | | 139,93451 | 106,7772 | 0.5941091 | 179,72657 |
| | 1350 | .828291490661 | | | 264,45756 | 169,42916 | 0.525187 | 322,60728 |
| | 1400 | .832082361333 | | | 269,45756 | 260,12114 | 0.4683676 | 555,3781 |

| | | | | | | |
|------|---------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1400 | .832082361333 | | 269.45756 | 260.12114 | 0.4683676 | 555.3781 |
| 1450 | .934591747659 | | 363.26977 | 387.72396 | 0.4210069 | 920.94432 |
| 1500 | .836292016015 | | 401.56589 | 562.74695 | 0.1811143 | 1476.5053 |

| Tempo- tura K | α | β | γ | δ | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 |
|------------------|-----------|---------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10.73.15 | .0263157 | 1.63115145435 | .0292529 | .020747 | 21.667666 | 7.6573755 | 1.2002173 | 6.3762724 |
| | .0555555 | 1.37110595442 | .0585058 | .0414941 | | | | |
| | .0882352 | 1.51230030277 | .0877581 | .0622412 | | | | |
| | .125 | 1.4527309074 | .1170117 | .0829882 | | | | |
| | .1666667 | 1.39241550589 | .1462646 | .1037351 | | | | |
| | .2142857 | 1.33342943696 | .1795175 | .1244824 | | | | |
| | .2692307 | 1.27372162468 | .2047705 | .1452294 | | | | |
| | .3264462 | 1.16717918382 | .1698274 | .2257725 | | | | |
| | .3333333 | 1.21397966542 | .2340234 | .1659765 | | | | |
| | .4090909 | 1.15420711981 | .2632763 | .1867236 | | | | |
| | .5 | 1.09440607503 | .2925293 | .2074707 | | | | |
| | .6111111 | 1.03457981304 | .3217022 | .2202177 | | | | |
| | .75 | .974731424692 | .3510351 | .2489648 | | | | |
| | .9285714 | .91874193921 | .380288 | .2697119 | | | | |
| | 1.0151515 | .71289078287 | .180918 | .4090819 | | | | |
| | 1.1066667 | .054977491152 | .409541 | .2904589 | | | | |
| | 1.5 | .795077644072 | .4307939 | .311206 | | | | |
| | 2.0 | .735165602993 | .4680468 | .3319531 | | | | |
| | 2.8333333 | .67524443155 | .4972998 | .3527001 | | | | |
| | 4.5 | .614791102231 | .5265527 | .3734472 | | | | |

| | | | | | | | | |
|---------|-----------|----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 9.5 | .640328703215 | .5558056 | .3941943 | | | | |
| 1123.15 | .0263157 | 1.73118348609 | .0292529 | .020747 | 34.558118 | 14.998014 | 1.0035473 | 14.944999 |
| | .0555555 | 1.66813005046 | .0585058 | .0414941 | | | | |
| | .0882352 | 1.60503195978 | .0875387 | .0622412 | | | | |
| | .125 | 1.54189083237 | .1170117 | .0829882 | | | | |
| | .1666667 | 1.47822111808 | .1462646 | .1037353 | | | | |
| | .2142857 | 1.41548460825 | .1755175 | .1244824 | | | | |
| | .2692307 | 1.35222281277 | .2047705 | .1452294 | | | | |
| | .3264462 | 1.23933413138 | .1698274 | .2257725 | | | | |
| | .3333333 | 1.28892336853 | .2340234 | .1659765 | | | | |
| | .4090909 | 1.2255885431 | .2632763 | .1867236 | | | | |
| | .5 | 1.1622189637 | .2925293 | .2074707 | | | | |
| | .6111111 | 1.09881645356 | .3217822 | .2282177 | | | | |
| | .75 | 1.03538246714 | .3510351 | .2489648 | | | | |
| | .9285714 | .971929813495 | .380288 | .2697119 | | | | |
| | 1.0151315 | .756981793442 | .180918 | .4890819 | | | | |
| | 1.1666667 | .908424582587 | .409541 | .2904589 | | | | |
| | 1.5 | .844903848774 | .4387939 | .311206 | | | | |
| | 2.0 | .781356381965 | .4680468 | .3319531 | | | | |
| | 2.8333333 | .717784301887 | .4972998 | .3527001 | | | | |
| | 4.5 | .654188687477 | .5265527 | .3734472 | | | | |
| | 9.5 | .680968208137 | .5558056 | .3941943 | | | | |
| 1173.15 | .0263157 | 1.79645431575 | .0292529 | .020747 | 53.236992 | 27.739666 | .8515482 | 32.575565 |
| | .0555555 | 1.73118963361 | .0585058 | .0414941 | | | | |
| | .0882352 | 1.66587389762 | .0875387 | .0622412 | | | | |
| | .125 | 1.600252426134 | .1170117 | .0829882 | | | | |

| | | | |
|-----------|---------------|----------|----------|
| .1666667 | 1.53476627093 | .1462646 | .1037353 |
| .2142857 | 1.46961552524 | .1755175 | .1244824 |
| .2692307 | 1.40409629149 | .2047705 | .1452294 |
| .3264462 | 1.2871532704 | .1698274 | .2257725 |
| .3333333 | 1.33852703009 | .2340234 | .1659765 |
| .4090909 | 1.27291156012 | .2632763 | .1867236 |
| .5 | 1.20724744895 | .2925243 | .2074707 |
| .6111111 | 1.14153639307 | .3217822 | .2262177 |
| .75 | 1.0757793109 | .3510351 | .2489648 |
| .9285714 | 1.00998770568 | .380288 | .2697119 |
| 1.0151515 | .787006243613 | .180918 | .4890819 |
| 1.1666667 | .944128857308 | .409541 | .2904589 |
| 1.5 | .878237027529 | .4387939 | .311206 |
| 2.0 | .812307446839 | .4680468 | .3319531 |
| 2.8333333 | .746323134241 | .4972998 | .3527001 |
| 4.5 | .680030586363 | .5265527 | .3734472 |
| 9.5 | .633977589314 | .5558056 | .3941943 |

Tabla XXI.

| Temperatura (K) | O/H | H ₂ | H ₂ O | CO | CO ₂ | CH ₄ |
|--------------------|-----------|----------------|------------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 1073.15 | .0263157 | 1.631351 | 0.0522844 | 0.0852711 | 1.1403477 E-3 | 0.1228238 |
| | .0555555 | 1.571860 | 0.0585878 | 0.1473709 | 3.406096 E-3 | 0.114029 |
| | .0.882352 | 1.5123 | 0.0643562 | 0.209096 | 6.8568528E-3 | 0.1055513 |
| | .125 | 1.45273 | 0.0694824 | 0.2600943 | 0.0106095 | 0.0973997 |
| | .16666667 | 1.392416 | 0.0748888 | 0.3189068 | 0.01595 | 0.0894799 |
| | .2142857 | 1.333429 | 0.0779701 | 0.3688424 | 0.0213361 | 0.08200592 |
| | .2692507 | 1.273722 | 0.0812985 | 0.4188281 | 0.0275109 | 0.074875 |
| | .3264462 | 1.167178 | 0.0857042 | 0.5059987 | 0.0401543 | 0.0628726 |
| | .3333333 | 1.213980 | 0.0840116 | 0.4679744 | 0.0343461 | 0.0680159 |
| | .4090909 | 1.154207 | 0.0861034 | 0.5164692 | 0.0418333 | 0.061483 |
| | .5 | 1.094406 | 0.0875692 | 0.5644376 | 0.0499649 | 0.055277 |
| | .6111111 | 1.034580 | 0.0884048 | 0.6119631 | 0.0587332 | 0.0493987 |
| | .75 | 0.9747314 | 0.0886062 | 0.6591063 | 0.0681309 | 0.0438488 |
| | .9285714 | 0.9187419 | 0.0836342 | 0.6915449 | 0.0750021 | 0.038956 |
| | 1.0151515 | 0.87121891 | 0.0819115 | 0.8621643 | 0.1165771 | 0.0234087 |
| | 1.1666667 | 0.8549775 | 0.0870911 | 0.7524132 | 0.0887863 | 0.0337362 |
| | 1.5 | 0.7950776 | 0.085367 | 0.7986362 | 0.1000302 | 0.0291747 |
| | 2.0 | 0.7351656 | 0.0829943 | 0.8446031 | 0.1118764 | 0.0249435 |
| 2.8333333 | 0.6752444 | 0.0799693 | 0.8903287 | 0.1243179 | 0.0210431 | |
| 4.5 | 0.6147912 | 0.0768739 | 0.9386611 | 0.1381818 | 0.0174438 | |
| 9.5 | 0.6403287 | 0.0223692 | 0.5711558 | 0.0511614 | 0.0189231 | |
| 1123.15 | .0263157 | 1.7311835 | 0.0246228 | 0.097806 | 6.4008242 E-4 | 0.0867233 |
| | .0555555 | 1.6681301 | 0.0293336 | 0.1690333 | 1.9118291 E-3 | 0.0805211 |
| | .0882352 | 1.605032 | 0.0336373 | 0.2321046 | 3.6047222 E-3 | 0.0745447 |
| | .125 | 1.5418908 | 0.037531 | 0.2922909 | 5.7165595 E-3 | 0.068795 |
| | .1666667 | 1.4782211 | 0.041582 | 0.3530672 | 8.3410156 E-3 | 0.0632308 |

| | | | | | | |
|-----------|------------|-----------|------------|------------|---------------|-----------|
| .2142857 | 1.4154846 | 0.0440779 | 0.4079139 | 0.0111884 | 0.0579775 | |
| .2692307 | 1.3522228 | 0.0467257 | 0.04662205 | 0.0145441 | 0.052911 | |
| .3264462 | 1.2393341 | 0.0504027 | 0.5674363 | 0.0215446 | 0.0444453 | |
| .3333333 | 1.2889234 | 0.0489535 | 0.5231146 | 0.0183104 | 0.0480733 | |
| .4090909 | 1.225589 | 0.0507575 | 0.5796842 | 0.0224847 | 0.0434649 | |
| .5 | 1.162219 | 0.0521374 | 0.6360006 | 0.0270657 | 0.0390864 | |
| .6111111 | 1.098816 | 0.0530901 | 0.6921019 | 0.0320512 | 0.0349381 | |
| .75 | 1.035382 | 0.0536119 | 0.7480085 | 0.0374384 | 0.0310206 | |
| .9285714 | 0.9719298 | 0.0536883 | 0.8036597 | 0.0432164 | 0.027335 | |
| 1.0151515 | 0.71569818 | 0.0507736 | 0.9912825 | 0.0657505 | 0.0165813 | |
| 1.1666667 | 0.9084246 | 0.0533573 | 0.8593365 | 0.0494118 | 0.0238796 | |
| 1.5 | 0.8449038 | 0.0523765 | 0.9147835 | 0.0559939 | 0.0206568 | |
| 2.0 | 0.7813564 | 0.0513577 | 0.9701015 | 0.0629707 | 0.0176664 | |
| 2.8333333 | 0.7177843 | 0.0496984 | 1.0252979 | 0.0703403 | 0.0149086 | |
| 4.5 | 0.6541887 | 0.0475964 | 1.0803717 | 0.0780999 | 0.0123838 | |
| 9.5 | 0.6809682 | 0.0519993 | 1.0519993 | 0.0858633 | 0.0134184 | |
| 1173.15 | .0263151 | 1.7964543 | 0.0115579 | 0.10222 | 3.2076 E-4 | 0.0606204 |
| | .0555555 | 1.7311896 | 0.0147248 | 0.1717065 | 9.0506915 E-4 | 0.0562957 |
| | .0882352 | 1.6658739 | 0.017629 | 0.2368915 | 1.7226898 E-3 | 0.0521279 |
| | .125 | 1.6002524 | 0.0205554 | 0.3025025 | 2.8090938 E-3 | 0.048102 |
| | .1666667 | 1.5347665 | 0.0230071 | 0.3662028 | 5.1167205 E-3 | 0.0442456 |
| | .2142857 | 1.4696155 | 0.0247642 | 0.04261806 | 5.57565 E-3 | 0.0405689 |
| | .2692307 | 1.4040963 | 0.0266098 | 0.4885231 | 7.3261928 E-3 | 0.0370322 |
| | .3264462 | 1.2871533 | 0.0292332 | 0.5992984 | 0.0110254 | 0.0311205 |
| | .3333333 | 1.3385279 | 0.0281869 | 0.5507003 | 9.3097643 E-3 | 0.0336543 |
| | .409909 | 1.2729116 | 0.0294935 | 0.6127527 | 0.011526 | 0.0304356 |
| | .5 | 1.2072474 | 0.0305287 | 0.6747221 | 0.0139752 | 0.0273765 |
| | .6111111 | 1.1415364 | 0.0312911 | 0.7366258 | 0.0166572 | 0.0244774 |

| | | | | | |
|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|---------------|
| .75 | 1.0757793 | 0.0317786 | 0.7984689 | 0.0195715 | 0.0217386, |
| .9285714 | 1.0099877 | 0.0319784 | 0.8601167 | 0.0227103 | 0.019161 |
| 1.0151515 | 0.7870062 | 0.0306432 | 1.0691171 | 0.035088 | 0.0116343 |
| 1.1666667 | 0.9441289 | 0.031925 | 0.9220308 | 0.0260975 | 0.0167436 |
| 1.5 | 0.878237 | 0.0315809 | 0.9837585 | 0.0297088 | 0.014488 |
| 2.0 | 0.8123014 | 0.0309570 | 1.0454624 | 0.0335525 | 0.0123942 |
| 2.8333333 | 0.7463231 | 0.0300516 | 1.1071375 | 0.037628 | 0.0104626 |
| 4.5 | 0.6800306 | 0.0291493 | 1.1742536 | 0.0423284 | 8.6864716 E-3 |
| 9.5 | 0.6339776 | 6.7286393E-3 | 0.6219107 | 0.0118731 | 7.5497804 E-3 |

TABLA XXII

| O/H | Temperatura (K) | H ₂ | H ₂ O | CO | CO ₂ | CH ₄ |
|----------|-----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| .3264462 | 298 | 1.5565493 E-5 | 0.9883435 | 4.2453277 E-12 | 0.0116486 | 0.1951342 |
| | 350 | 1.5873479 E-4 | 0.9604667 | 1.305565 E-9 | 0.03974539 | 0.209001 |
| | 400 | 8.7870807 E-4 | 0.9178082 | 7.3523615 E-8 | 0.817523 | 0.2299703 |
| | 450 | 3.4278187 E-2 | 0.8680858 | 1.6070636 E-6 | 0.1301994 | 0.2535569 |
| | 500 | 1.0359268 E-2 | 0.8176798 | 1.8353439 E-5 | 0.1771313 | 0.2752942 |
| | 550 | 2.5814568 E-2 | 0.7685976 | 1.3179936 E-4 | 0.218429 | 0.2921076 |
| | 600 | 5.5337772 E-2 | 0.7198573 | 6.7088868 E-4 | 0.2521375 | 0.3017162 |
| | 650 | 0.1051025 | 0.6684344 | 2.6191763 E-3 | 0.2763043 | 0.3025453 |
| | 700 | 0.1817578 | 0.6017254 | 8.0913037 E-3 | 0.2761482 | 0.2975721 |
| | 750 | 0.2831926 | 0.5513151 | 0.0222692 | 0.2959544 | 0.2720599 |
| | 800 | 0.4121708 | 0.481454 | 0.0515651 | 0.2866778 | 0.2425014 |
| | 850 | 0.5603361 | 0.4047713 | 0.104986 | 0.2625678 | 0.20676 |
| | 900 | 0.7171935 | 0.3238268 | 0.1892516 | 0.222951 | 0.1688036 |

| | | | | | | |
|-----------|---------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| | 950 | 0.8707693 | 0.243056 | 0.3018135 | 0.1706523 | 0.132401 |
| | 1000 | 1.0093518 | 0.168772 | 0.4241529 | 0.1143757 | 0.1001518 |
| | 1050 | 1.1240177 | 0.1079523 | 0.5271654 | 0.0664563 | 0.0733288 |
| | 1073.15 | 1.1671792 | 0.0857027 | 0.5622596 | 0.04958 | 0.0628728 |
| | 1100 | 1.2093441 | 0.0647019 | 0.5922782 | 0.0344867 | 0.0522907 |
| | 1123.15 | 1.2393341 | 0.0504027 | 0.6100484 | 0.0249019 | 0.0444449 |
| | 1150 | 1.2707645 | 0.0340591 | 0.5629944 | 0.0138399 | 0.0369019 |
| | 1173.15 | 1.2871533 | 0.0292332 | 0.6300098 | 0.0121843 | 0.0311205 |
| | 1200 | 1.3033074 | 0.0219084 | 0.6342051 | 8.3461532 E-3 | 0.0257058 |
| | 1250 | 1.3293366 | 0.0130388 | 0.6360983 | 4.2347043 E-3 | 0.018116 |
| | 1300 | 1.3447864 | 7.9941023 E-3 | 0.6347386 | 2.2417004 E-3 | 0.0129235 |
| | 1350 | 1.3548566 | 5.0582745 E-3 | 0.6325534 | 1.2402615 E-3 | 9.3563627 E-3 |
| | 1400 | 1.3615679 | 3.2997064 E-3 | 0.6303933 | 7.1354102 E-4 | 6.8799968 E-3 |
| | 1450 | 1.3661376 | 2.2148156 E-3 | 0.6285875 | 4.2904038 E-4 | 5.1375922 E-3 |
| | 1500 | 1.3693145 | 1.5253379 E-3 | 0.6268678 | 2.661442 E-4 | 3.8935943 E-3 |
| 1.0151515 | 298 | 3.3263786 E-6 | 0.8230918 | 1.6544086 E-11 | 0.1769049 | 8.9115057 E-3 |
| | 350 | 5.6238002 E-5 | 0.7883566 | 3.0236165 E-9 | 0.2116151 | 0.0262526 |
| | 400 | 4.0233203 E-4 | 0.7438523 | 1.2998171 E-7 | 0.2553117 | 0.0483315 |
| | 450 | 1.8104576 E-3 | 0.6976435 | 2.4453074 E-6 | 0.3014463 | 0.0707321 |
| | 500 | 5.9462969 E-3 | 0.6535615 | 2.5556603 E-5 | 0.3434525 | 0.0907051 |
| | 550 | 1.5591402 E-2 | 0.612212 | 1.7381843 E-4 | 0.3799054 | 0.1065574 |
| | 600 | 3.4482239 E-2 | 0.5721338 | 8.5571249 E-4 | 0.4101968 | 0.117151 |
| | 650 | 6.6650391 E-2 | 0.5309355 | 3.280636 E-3 | 0.4334852 | 0.1216661 |
| | 700 | 0.1151505 | 0.4868942 | 0.0103343 | 0.4504735 | 0.1194367 |
| | 750 | 0.1809025 | 0.4379814 | 0.0276948 | 0.4577317 | 0.1110171 |
| | 800 | 0.2615765 | 0.3840034 | 0.0648059 | 0.4528054 | 0.0976691 |
| | 850 | 0.3519846 | 0.3257611 | 0.1345073 | 0.4309931 | 0.0815862 |

| | | | | | |
|---------|-----------|---------------|-----------|---------------|---------------|
| 900 | 0.4455028 | 0.2651467 | 0.2494588 | 0.387372 | 0.0651343 |
| 950 | 0.5357587 | 0.2049196 | 0.4135707 | 0.3204309 | 0.0501214 |
| 1000 | 0.6173691 | 0.1486422 | 0.6108687 | 0.2372382 | 0.0374534 |
| 1050 | 0.6858501 | 0.100465 | 0.8040327 | 0.1545931 | 0.0273015 |
| 1073.15 | 0.7121893 | 0.0819113 | 0.8807006 | 0.1216437 | 0.0234087 |
| 1100 | 0.7382556 | 0.0636891 | 0.9550299 | 0.0896673 | 0.0194867 |
| 1123.15 | 0.7570279 | 0.0507234 | 1.0049171 | 0.0675116 | 0.0165834 |
| 1150 | 0.7747166 | 0.038771 | 1.0512358 | 0.0482533 | 0.0137153 |
| 1173.15 | 0.7870063 | 0.0306431 | 1.0800795 | 0.0358112 | 0.0116343 |
| 1200 | 0.7983528 | 0.0233332 | 1.1043618 | 0.0253075 | 9.6160512 E-3 |
| 1250 | 0.8131714 | 0.0141894 | 1.1316447 | 0.0134027 | 6.7786805 E-3 |
| 1300 | 0.8224293 | 8.8216642 E-3 | 1.1453296 | 7.298753 E-3 | 4.8336179 E-3 |
| 1350 | 0.8282915 | 5.6328423 E-3 | 1.1522124 | 4.1151998 E-3 | 3.4969389 E-3 |
| 1400 | 0.8320824 | 3.6968748 E-3 | 1.1556972 | 2.4049129 E-3 | 2.5694626 E-3 |
| 1450 | 0.8345917 | 2.4916458 E-3 | 1.157537 | 1.4549109 E-3 | 1.9174271 E-3 |
| 1500 | 0.836292 | 1.7215744 E-3 | 1.1584599 | 9.0892281 E-4 | 1.4523128 E-3 |

TABLA XXIII Combustión completa

| Temperatura | α | CO ₂ | CO | H ₂ O | H ₂ | CH ₄ |
|-------------|---------------|-----------------|---------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 298 | 6.9567464 E-6 | 5.97 E-2 | 9.6108105 E-12 | 2.1899848 E-2 | 1.5235169 E-7 | 1.8694002 E-5 |
| 350 | 1.3435316 E-4 | 5.9699984 E-2 | 1.6059811 E-9 | 2.1897058 E-2 | 2.9419389 E-6 | 7.1791262 E-5 |
| 400 | 1.1203549 E-3 | 5.9699978 E-2 | 6.2829545 E-8 | 2.1875492 E-2 | 2.4508315 E-5 | 1.7889963 E-4 |
| 450 | 5.8314038 E-3 | 5.9699875 E-2 | 1.0882161 E-6 | 2.1773033 E-2 | 1.2696735 E-4 | 3.4787562 E-4 |
| 500 | 2.182279 E-2 | 5.9698919 E-2 | 1.0654988 E-5 | 2.1432288 E-2 | 4.6771232 E-4 | 5.6117281 E-4 |
| 550 | 6.4247193 E-2 | 5.9693094 E-2 | 6.8900143 E-5 | 2.05779912 E-2 | 1.3220879 E-3 | 7.6618548 E-4 |
| 600 | 0.158024 | 5.9667348 E-2 | 3.2636235 E-4 | 1.8911525 E-2 | 2.9884749 E-3 | 8.7994307 E-4 |
| 650 | 0.338615 | 5.9578362 E-2 | 1.21622 E-3 | 1.6360193 E-2 | 5.5398068 E-3 | 8.4053077 E-4 |
| 700 | 0.651699 | 5.9324954 E-2 | 3.7503 E-3 | 1.3259074 E-2 | 8.6409255 E-3 | 6.7255334 E-4 |
| 750 | 1.153309 | 5.8708141 E-2 | 9.91842 E-3 | 1.0170393 E-2 | 1.1729605 E-2 | 4.66732 E-4 |
| 800 | 1.913335 | 5.739277 E-2 | 2.307213 E-2 | 7.5171574 E-3 | 1.4382841 E-2 | 2.9529029 E-4 |
| 850 | 3.02744 | 5.4899393 E-2 | 4.80059 E-2 | 5.437697 E-3 | 1.6462301 E-2 | 1.7846396 E-4 |
| 900 | 4.645387 | 5.0677188 E-2 | 9.022794 E-2 | 3.8792731 E-3 | 1.8020725 E-2 | 1.0657458 E-4 |
| 950 | 7.030026 | 4.4319195 E-2 | 1.538078 ⁷ E-1 | 2.727263 E-3 | 1.9172734 E-2 | 6.4187887 E-5 |
| 1000 | 10.672846 | 3.5927725 E-2 | 2.3772257 E-1 | 1.876149 E-3 | 2.0023849 E-2 | 3.9400065 E-5 |
| 1050 | 16.505751 | 2.6445293 E-2 | 3.3254689 E-1 | 1.2510174 E-3 | 2.0648981 E-2 | 2.4747169 E-5 |
| 1073.15 | 20.383333 | 2.2133128 E-2 | 3.7566854 E-1 | 1.0241621 E-3 | 2.0875836 E-2 | 2.0112943 E-5 |
| 1100 | 26.235465 | 1.7504119 E-2 | 4.2195863 E-1 | 8.0409856 E-4 | 2.10959 E-2 | 1.591188 E-5 |
| 1123.15 | 32.807063 | 1.3984176 E-2 | 4.5715806 E-1 | 6.4779359 E-4 | 2.1255205 E-2 | 1.3069468 E-5 |
| 1150 | 42.736683 | 1.0548668 E-2 | 4.9151314 E-1 | 5.0072382 E-4 | 2.1399275 E-2 | 1.0464481 E-5 |
| 1173.15 | 53.817266 | 8.155811 E-3 | 5.1544171 E-1 | 3.9950915 E-4 | 2.150049 E-2 | 8.683268 E-6 |
| 1200 | 70.347793 | 5.986731 E-3 | 5.371325 E-1 | 3.0694712 E-4 | 2.1593052 E-2 | 7.0345306 E-6 |
| 1250 | 115.04028 | 3.326066 E-3 | 5.6373915 E-1 | 1.8872756 E-4 | 2.1711272 E-2 | 4.8322735 E-6 |
| 1300 | 184.61218 | 1.861332 E-3 | 5.7838649 E-1 | 1.1798794 E-4 | 2.1782012 E-2 | 3.3905578 E-6 |
| 1350 | 288.95913 | 1.065686 E-3 | 5.8634296 E-1 | 7.552794 E-5 | 2.1824472 E-2 | 2.4277719 E-6 |
| 1400 | 440.34826 | 6.28304 E-4 | 5.9071678 E-1 | 4.9620679 E-5 | 2.1850379 E-2 | 1.7744755 E-6 |
| 1450 | 653.63711 | 3.82066 E-4 | 5.9317916 E-1 | 3.3453649 E-5 | 2.1866546 E-2 | 1.316228 E-6 |
| 1500 | 946.42082 | 2.39454 E-4 | 5.9460528 E-1 | 2.3115388 E-5 | 2.1876884 E-2 | 9.9383711 E-7 |

TABLA XXIV COMBUSTION INCOMPLETA

| Temperatura (K) | u | CO ₂ | CO | H ₂ O | H ₂ | CH ₄ |
|-----------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|
| 298 | 5.4269876 E-6 | 9.81 E-2 | 1.2319905 E-11 | 7.1999609 E-2 | 3.90737 E-7 | 1.2296367 E-4 |
| 350 | 1.0480946 E-4 | 9.8099998 E-2 | 2.0586752 E-9 | 7.1992454 E-2 | 7.5454903 E-6 | 4.7225789 E-4 |
| 400 | 8.7399384 E-4 | 9.8099919 E-2 | 8.0539913 E-8 | 7.1937127 E-2 | 6.2872606 E-5 | 1.1773496 E-3 |
| 450 | 4.5491306 E-3 | 9.8098605 E-2 | 1.3949539 E-6 | 7.1673945 E-2 | 3.2605414 E-4 | 2.2941369 E-3 |
| 500 | 1.7025083 E-2 | 9.8086342 E-2 | 1.3657568 E-5 | 7.0794713 E-2 | 1.2052859 E-3 | 3.7266547 E-3 |
| 550 | 5.013974 E-2 | 9.8011713 E-2 | 8.8287063 E-5 | 6.8562303 E-2 | 3.4378961 E-3 | 5.1802202 E-3 |
| 600 | 0.1235051 | 9.768242 E-2 | 4.175802 E-4 | 6.4085144 E-2 | 7.9149549 E-3 | 6.1722181 E-3 |
| 650 | 0.2654917 | 9.6551715 E-2 | 1.5482849 E-3 | 5.687241 E-2 | 1.5127589 E-2 | 6.2676366 E-3 |
| 700 | 0.5194039 | 9.3394476 E-2 | 4.7055236 E-3 | 4.7387004 E-2 | 2.4612995 E-2 | 5.4567636 E-3 |
| 750 | 0.9524013 | 8.6089303 E-2 | 1.2010697 E-2 | 3.6877664 E-2 | 3.5122335 E-2 | 4.1847312 E-3 |
| 800 | 1.7056682 | 7.2218808 E-2 | 2.5881192 E-2 | 2.6610801 E-2 | 4.5389198 E-2 | 2.9407955 E-3 |
| 850 | 3.1235861 | 5.1571743 E-2 | 4.6528256 E-2 | 1.746053 E-2 | 5.4539469 E-2 | 1.9588052 E-3 |
| 900 | 6.1000904 | 2.938893 E-2 | 6.871107 E-2 | 1.0140716 E-2 | 6.1859283 E-2 | 1.2557954 E-3 |
| 950 | 12.770506 | 1.343042 E-2 | 8.466958 E-2 | 5.228565 E-3 | 6.6771433 E-2 | 7.7851392 E-4 |
| 1000 | 27.386464 | 5.4565518 E-3 | 9.2643448 E-2 | 2.5364201 E-3 | 6.9463579 E-2 | 4.7415041 E-4 |
| 1050 | 57.235628 | 2.1993081 E-3 | 9.5900692 E-2 | 1.2363565 E-3 | 7.0763043 E-2 | 2.9063349 E-4 |
| 1073.15 | 79.239827 | 1.4645562 E-3 | 9.6635444 E-2 | 8.973105 E-4 | 7.1102689 E-2 | 2.3332497 E-4 |
| 1100 | 113.92493 | 9.2828274 E-4 | 9.7171717 E-2 | 6.2649592 E-4 | 7.1373504 E-2 | 1.8213752 E-4 |
| 1123.15 | 153.88199 | 6.3561769 E-4 | 9.7464382 E-2 | 4.6487006 E-4 | 7.153513 E-2 | 1.4807736 E-4 |
| 1150 | 215.03808 | 4.1664718 E-4 | 9.7683353 E-2 | 3.3327458 E-4 | 7.1666725 E-2 | 1.1736935 E-4 |
| 1173.15 | 283.61825 | 2.9365816 E-4 | 9.7806341 E-2 | 2.5297043 E-4 | 7.1747029 E-2 | 9.6692844 E-5 |
| 1200 | 385.9675 | 1.9888507 E-4 | 9.7901115 E-2 | 1.8060649 E-4 | 7.1813935 E-2 | 7.7808046 E-5 |
| 1250 | 661.76584 | 1.0051298 E-4 | 9.7999487 E-2 | 1.0863565 E-4 | 7.1891364 E-2 | 5.2982741 E-5 |
| 1300 | 1089.0463 | 5.3487464 E-5 | 9.8046512 E-2 | 6.6052237 E-5 | 7.1933947 E-2 | 3.697796 E-5 |
| 1350 | 1727.6316 | 2.9812596 E-5 | 9.8070182 E-2 | 4.1651443 E-5 | 7.1958348 E-2 | 2.6392635 E-5 |
| 1400 | 2652.0596 | 1.7321914 E-5 | 9.8082677 E-2 | 2.7138478 E-5 | 7.1972861 E-2 | 1.9224151 E-5 |
| 1450 | 3952.7508 | 1.0447513 E-5 | 9.8089642 E-2 | 1.8208298 E-5 | 7.1981791 E-2 | 1.4263169 E-5 |
| 1500 | 5736.8415 | 6.5186949 E-6 | 9.8093492 E-2 | 1.2548273 E-5 | 7.1987451 E-2 | 1.076113 E-5 |

Nota: Las presiones máximas permitidas de oxígeno para evitar la oxidación del aluminio son:

$$P_{O_2} = 801.4^\circ C \quad P_{O_2} = 5.6835696 E-44$$

Para $T = 850^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 1.5020667 \text{ E-41}$

Para $T = 900^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 2.4677364 \text{ E-39}$

a) Cuanto a las presiones parciales de trabajo durante la combustión completa son las siguientes:

Para $T = 800^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 1.3051534 \text{ E-21}$

Para $T = 850^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 5.8932744 \text{ E-21}$

Para $T = 900^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 2.0772251 \text{ E-20}$

b) Las presiones parciales de trabajo durante la combustion incompleta son:

Para $T = 800^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 8.6362421 \text{ E-23}$

Para $T = 850^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 2.6786477 \text{ E-22}$

Para $T = 900^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{O}_2} = 7.4792518 \text{ E-22}$

APENDICE II

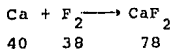
COMPOSICION DE LA ESCORIA

De la Tabla XIII se hizo un cálculo para encontrar la composición promedio de la escoria, la cual se muestra a continuación:

| | |
|-------------------|---------------|
| Nitrógeno | 1.0884286 |
| Alúmina | 25.548036 |
| Magnesio | 0.1730928 |
| Fluor | 0.3287499 |
| Calcio | 2.4428571 E-3 |
| Hierro | 0.5932857 |
| Manganeso | 0.0113357 |
| Potasio | 0.1518428 |
| Cobre | 0.0228642 |
| Sodio | 0.0438214 |
| Titanio | 0.01845 |
| Silicio | 0.035 |
| Aluminio metálico | 35.332143 |

Según la termodinámica (48), se encontraron las fases viables en formar parte de la composición de la escoria.

1. Con el flúor se forma primero el CaF_2 :

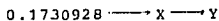
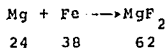


$$2.4428571\text{E}-3 \longrightarrow x \longrightarrow y.$$

$$x = 2.3207142\text{E}-3\text{g-mol}^{-1} \quad y = 4.7635713\text{E}-3\text{g-mol}^{-1}$$

El flúor restante será: $0.3287499 - 2.3207142\text{E}-3 = 0.3264292$
 g-mol^{-1} .

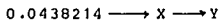
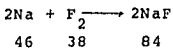
2. Con el magnesio y el flúor restante se forma el MgF_2 :



$$X = 0.2740636 \text{ g-mol}^{-1} \quad Y = 0.4471564 \text{ g-mol}^{-1}$$

$$\text{El flúor restante será: } 0.3264292 - 0.2740636 = 0.0523656 \text{ g-mol}^{-1}$$

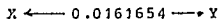
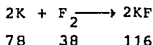
3. Este reacciona con el sodio para formar el NaF:



$$X = 0.0362002 \text{ g-mol}^{-1} \quad Y = 0.0800216 \text{ g-mol}^{-1}$$

$$\text{El flúor restante será: } 0.0523656 - 0.036002 = 0.0161654 \text{ g-mol}^{-1}$$

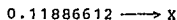
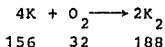
4. Cantidad de KF formado por el potasio y flúor restante:



$$X = 0.0331816 \text{ g-mol}^{-1} \quad Y = 0.049347 \text{ g-mol}^{-1}$$

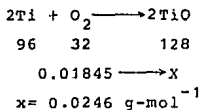
$$\text{El potasio residual será: } 0.1518428 - 0.0331816 = 0.1186612 \text{ g-mol}^{-1}$$

5. Este reacciona con oxígeno para formar K_2O :

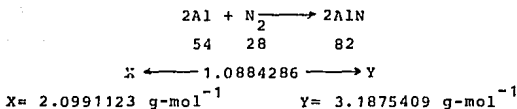


$$X = 0.1430019 \text{ g-mol}^{-1}$$

6. El titanio reacciona con oxígeno para formar TiO ;

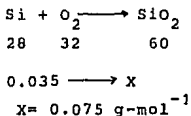


7. Cantidad de nitruro de aluminio formado:

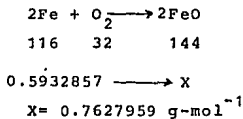


8. Aluminio metálico residual es de: $35.332143 - 2.0991123 =$
 $33.232988 \text{ g-mol}^{-1}$

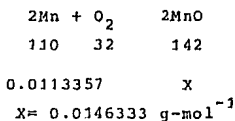
9. Cantidad de sílice formado:



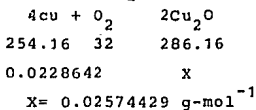
10. Cantidad de óxido ferroso formado:



11. Cantidad de óxido de manganeso (MnO) formado:



12. Cantidad de óxido cuproso (Cu_2O) formado:



Normalizando esta composición de la escoria, se tienen los siguientes porcentajes:

| | |
|-------------------------|----------------|
| Al_2O_3 | 40.17263% |
| AlN | 5.0122014% |
| Aluminio metálico | 52.256718% |
| Cu_2O | 0.0404479% |
| MnO | 0.0230099% |
| FeO | 1.1994471% |
| TiO | 0.0386819% |
| K_2O | 0.2248612% |
| KF | 0.0775949% |
| NaF | 0.1258287% |
| MgF_2 | 0.7031244% |
| CaF_2 | 7.49004069E-3% |
| SiO_2 | 0.1179326% |

Suponiendo que el aluminio metálico está contenido en la escoria por arrastre mecánico se puede definir la composición química de esta última:

| | |
|-------------------------|------------|
| Al_2O_3 | 84.143001% |
| AlN | 10.498234% |
| Cu_2O | 0.084785% |
| MnO | 0.048195% |
| FeO | 2.512285% |
| TiO | 0.081021% |
| K_2O | 0.470980% |
| KF | 0.162525% |
| NaF | 0.263553% |
| MgF_2 | 11.472719% |
| CaF_2 | 0.015689% |
| SiO_2 | 0.247014% |

De este análisis de la escoria se puede concluir que los principales constituyentes de la escoria son la alúmina y el nitruro de aluminio con un contenido elevado de FeO como impureza (2.51%)

APENDICE III

INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CHATARRA

Como se mencionó previamente el área de superficie y el espesor de la chatarra juegan un papel importante en la oxidación. De un cálculo hecho a partir de la carga de ALME-XA, se tendría lo siguiente:

- Lingotes de 60 x 15 x 10 (cm)
- Papel aluminio de espesor: 7, 10, 13 y 100 (µm)

Considerando despreciable la película de alúmina a baja temperatura, entonces como es el mismo material (aleación) a volumen igual peso igual. Considerando también que a altas temperaturas el espesor de la capa de alúmina varía de 0.5 a 1µm (33, 49). Al efectuar el cálculo se obtiene lo siguiente:

$$a) e_c = 0.5 \mu\text{m} = \text{espesor de la capa de } \text{Al}_2\text{O}_3$$

Volumen del lingote de primera fusión:

$$60 \times 15 \times 10 = 9000 \text{ cm}^3$$

Area expuesta del lingote:

$$(60 \times 15 + 60 \times 10 + 5 \times 10) \times 2 = 330 \text{ cm}^2$$

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = \frac{0.165 \times 100\%}{9000} = 1.83 \times 10^{-3} \%$$

Area expuesta para el papel de aluminio de espesor (e= 100 µm)

$$2 \times \frac{9000 \text{ cm}^3}{100 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 900 \ 000 \times 2 = 1'800,000 \text{ cm}^2$$

Volumen de la capa de Al_2O_3 formada:

$$1 \ 800 \ 000 \times 0.5 \times 10^{-4} = 90 \text{ cm}^3$$

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = \frac{90 \times 100\%}{9000} = 1\%$$

Area expuesta para el papel aluminio de espesor ($e = 13 \mu\text{m}$)

$$2 \times \frac{9000 \text{ cm}^3}{13 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 13'846,154 \text{ cm}^2$$

Volumen de la capa de Al_2O_3 formada:

$$13'846,154 \times 0.5 \times 10^{-4} = 692.39769 \Delta 692.31 \text{ cm}^3$$

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = \frac{692.31 \times 100\%}{9000} = 7.7\%$$

Area expuesta para el papel aluminio de espesor ($e = 10 \mu\text{m}$)

$$2 \times \frac{9000 \text{ cm}^3}{10 \times 10^{-4}} = 18'000,000 \text{ cm}^2$$

Volumen de la capa de Al_2O_3 formada:

$$18'000,000 \times 0.5 \times 10^{-4} = 900 \text{ cm}^3$$

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = \frac{900 \times 100\%}{9000} = 10\%$$

Area expuesta para el papel aluminio de espesor ($e = 7 \mu\text{m}$)

$$2 \times \frac{9000 \text{ cm}^3}{7 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 25'714,286 \text{ cm}^2$$

Volumen de la capa de Al_2O_3 formada:

b) Ahora, si la oxidación es máxima, se tiene el espesor de la capa de Al_2O_3 ($e_c = 1 \mu\text{m}$), entonces:

Para el lingote: % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.66 \times 10^{-3}$ %

Para el papel aluminio ($e = 100 \mu\text{m}$): % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$ %

Para el papel aluminio ($e = 13 \mu\text{m}$): % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.4$ %

Para el papel aluminio ($e = 10 \mu\text{m}$): % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20$ %

Para el papel aluminio ($e = 7 \mu\text{m}$): % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 28.6$ %

De estos cálculos se puede concluir que a menor espesor (o a mayor área de superficie expuesta), mayor es la proporción de alúmina formada.

APENDICE IV

METODOS VOLUMETRICOS DE DETERMINACION DE: F_2 Y N_2

1. METODO WILLARD WINTER PARA LA DETERMINACION DE FLUOR EN FOSFATOS (21).

I. Aparato: Tren de destilación.

1. Frasco Claissen de 250 c.c.
2. Termómetro centígrado
3. Matraz Florence de 2000 c.c.
4. Dos pinzas de Mohr
5. Refrigerante Liebig
6. Matraz Erlenmeyer de 500 c.c.
7. Dos mecheros Bunsen

II. Reactivos: Acido perclórico de 70%.

Nitrato de torio 0.1. Para valorar esta solución se titula el flúor que se obtiene al destilar 50 mg de CaF_2 de una pureza conocida, usando el procedimiento que se indicará después.

Alizarina roja al 0.05%

Hidróxido de sodio al 2%

Acido clorhídrico 1 en 200

Solución buffer

9.448 g de ácido monocloroacético + 2.0 g de hidróxido de sodio, todo esto disuelto en 100 c.c. de agua destilada.

Procedimiento:

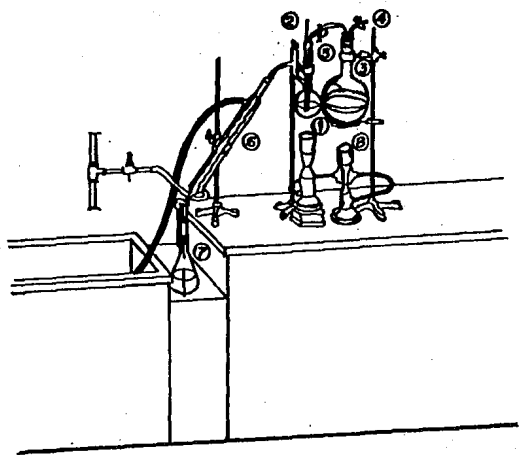
Se coloca de 100 a 500 g de muestra con la ayuda de un poco de agua en el frasco de destilación Claissen (1).

(Veáse la ilustración que muestra como funciona el aparato). Este contiene 10 cuentas de vidrio. Se ajusta el volumen a 30 c.c. aproximadamente, se le agregan 5 c.c. de ácido perclórico. Se cierra el frasco con un tapón de caucho atravesado por dos agujeros. A través de uno de ellos pasa un termómetro (2) y por el otro entra un tubo de vidrio de 4 mm de diámetro. Tanto el termómetro como el tubo de vidrio deben penetrar en la solución.

El tubo de vidrio conecta el destilador al frasco Florence (3) el cual contiene agua. Donde ésta se calienta para generar vapor. El frasco Florence está equipado por dos descargas (4) para liberar vapor al exterior y (5) para llevar el vapor al destilador. Se conecta el frasco de destilación (1) al refrigerante (6) y se empieza la destilación hasta que la solución alcanza 135°C.

Mientras esto se hace, se calienta a ebullición el agua contenida en el matraz Florence, abriendo la llave que va al exterior.

Cuando el termómetro marca los 135°C, se separa la pinza Mohr (5) para que entre vapor de agua al destilador (1) y se cierra la llave (4) y se regula el flujo de modo que el volumen de la solución en el destilador se mantenga constante. El calor aplicado al destilador debe graduarse para mantener constante la temperatura de 135°C. Se continúa destilando hasta que se reúnan 250 c.c. en el matraz Erlenmeyer de 500 c.c. Al destilado se le agregan 5 gotas de indicador (alizarina roja). Posteriormente, se añade gota a gota hidróxido de sodio al 27% por medio de una bureta hasta que aparezca justamente el color rosado y después se le añade también gota a gota áci-



APARATO PARA DESTILAR FLUOR POR
EL METODO DE WILLARD - WINTHER

do clorhídrico 1 en 200, usando nuevamente una bureta, hasta que desaparezca el color. Se le añade 1 c.c. de solución buffer y se titula con solución 0.1N de nitrato de torio hasta que vuelva a aparecer el color rosado permanente.

Debe apuntarse que 1 c.c. de solución 0.1N de nitrato de torio es equivalente a 0.0019 g de flúor. Para obtener el por ciento de CaF_2 se multiplica el por ciento de 2.0545.

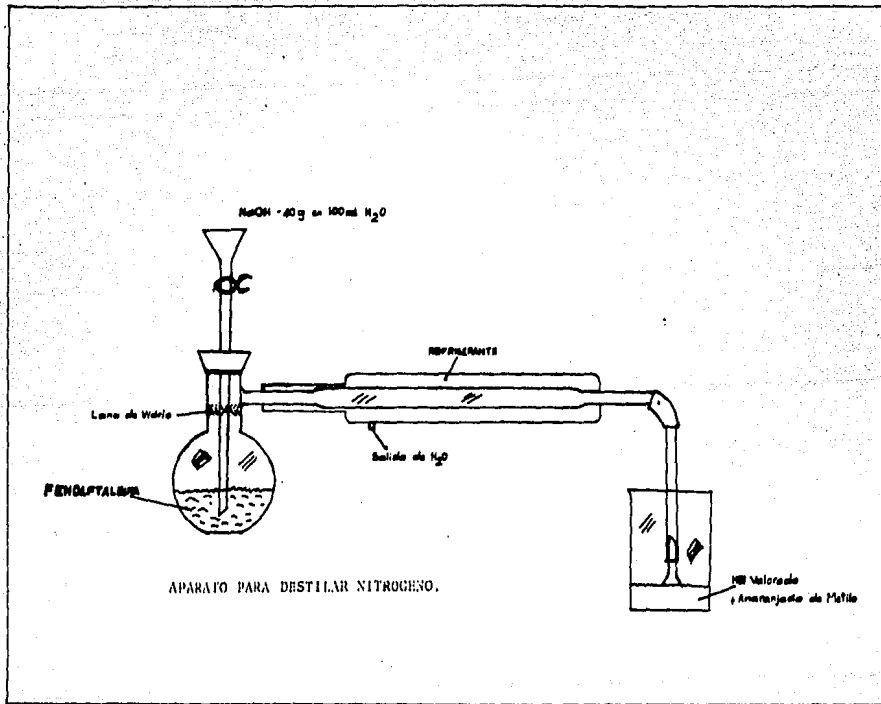
Solución 0.1N de $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ = 13.8055 g/lit.

2. METODO PARA LA DETERMINACION DE NITROGENO.

Mezclar 3 g de muestra + 2 g de sulfato de sodio + 0.5 g de sulfato de cobre + 25 ml de ácido sulfúrico concentrado y se pone a digestión a temperatura baja hasta que se quemé toda la materia orgánica, después se sube la temperatura durante 3 ó 2 horas hasta que la solución quede azul o ver de dependiendo de la cantidad de materia orgánica.

Una vez realizados estos pasos se procede a destilar pasando la muestra a un matraz de destilación con la mínima cantidad de agua, se le ponen unas piedras de ebullición. En dicho matraz debe de ir un tubo de vidrio que casi tope con la base de dicho matraz. En el extremo superior se une al tubo por medio de una manguera con un pequeño embudo el cual va a contener sosa concentrada con unas gotas de fenolftaleina. En la manguera va una llave de paso para abrir y cerrar cuando se desee.

A la solución se le agrega sosa a la fenolftaleina hasta que dé una coloración rojiza del aire de la fenolftaleina.



En el extremo del refrigerante se coloca un embudo el cual va unido con una manguera; dicho embudo se sumerge a un vaso que contiene una solución de ácido clorhídrico (10 ml medidos) de una concentración conocida a la cual se le agregan unas gotas de naranja de metilo.

Nota:

Debe tenerse mucho cuidado de que no se sifonee la muestra cuando se está destilando. Una vez que se destilan alrededor de 150 ml de solución problema, se saca y se lava el refrigerante y el embudo con una pequeña cantidad de agua. Dicha muestra o solución se titula con NaOH de concentración conocida y se hacen los cálculos para la determinación de nitrógeno presente en la muestra. El porcentaje de proteína se multiplica por el factor de 6.38.

$$\% N_2 = \frac{V \text{ NaOH} \times N \text{ NaOH} \times \text{meq (14)} \times 100}{\text{Peso de Muestra (mg)}}$$

El V NaOH es el número de los 100 ml gastados.

APENDICE V
PROGRAMA DE COMPUTO

```

10 ! PROGRAMA I - A
20 ! ESTE PROGRAMA CALCULA LA PRESION PARCIAL DE HIDROGENO (RAIZ DE LA ECUACION DE CUARTO GRADO)
30 ! NOTA: A,B,C,D,E SON LOS COEFICIENTES DE LA ECUACION
40 R=.01
50 PRINT
60 PRINT
70 INPUT "CUAL ES EL VALOR DE A ",A
80 PRINT " EL VALOR DE A ES ",A
90 !A=-13.103666
100 INPUT "CUAL ES EL VALOR DE B ",B
110 PRINT " EL VALOR DE B ES ",B
120 !B=792.70248
130 INPUT "CUAL ES EL VALOR DE C ",C
140 PRINT " EL VALOR DE C ES ",C
150 !C=3197.6121
160 INPUT "CUAL ES EL VALOR DE D ",D
170 PRINT " EL VALOR DE D ES ",D
180 !D=-18851.848
190 INPUT "CUAL ES EL VALOR DE E ",E
200 PRINT " EL VALOR DE E ES ",E
210 !E=16411.234
220 INPUT "¿SON CORRECTOS SUS DATOS (SI/NO)? ",L$
230 IF L$="SI" OR L$="sI" THEN 270
240 IF L$="NO" OR L$="no" THEN 40
250 GOTO 220
260 PRINT
270 PRINT CHR$(129),"CALCULANDO " ,CHR$(128)
280 FOR X=0 TO 3 STEP R
290 Z=(A*(X^4))+(B*(X^3))+(C*(X^2))+(D*(X))+E
300 IF Z<=1000 AND Z>=(-1000) THEN 320
310 NEXT X
320 IF Z<0 THEN 340
330 GOTO 360
340 X=X-.01
350 GOTO 360
360 FOR X=X TO 3 STEP .00001
370 Z=(A*(X^4))+(B*(X^3))+(C*(X^2))+(D*(X))+E
380 IF Z<=100 AND Z>=(-100) THEN 400
390 NEXT X
400 IF Z<0 THEN 420
410 GOTO 440
420 X=X-.00001
430 GOTO 440
440 FOR X=X TO 3 STEP .000001
450 Z=(A*(X^4))+(B*(X^3))+(C*(X^2))+(D*(X))+E
460 IF Z<=10 AND Z>=(-10) THEN 480
470 NEXT X
480 IF Z<0 THEN 500

```

```

490          GOTO 520
500          X=X-.000001
510          GOTO 520
520      FOR X=X TO 3 STEP .0000001
530          Z=(A*(X^4)+(B*(X^3)+(C*(X^2)+(D*(X))+E
540          IF Z<=1 AND Z>=(-1) THEN 560
550      NEXT X
560          IF Z<0 THEN 580
570          GOTO 600
580          X=X-.0000001
590          GOTO 600
600      FOR X=X TO 3 STEP .0000001
610          Z=(A*(X^4)+(B*(X^3)+(C*(X^2)+(D*(X))+E
620          IF Z<=.01 AND Z>=(-.01) THEN 660
630      NEXT X
640      PRINT
650      PRINT
660      PRINT "X= " ; X
670      PRINT "Z= " ; Z
680      PRINT ""
690      PRINT
700      INPUT "¿DESEA CORRER EL PROGRAMA OTRA VEZ (SI/NO)? ", Y$
710      IF Y$="SI" OR Y$="si" THEN 40
720      IF Y$="NO" OR Y$="no" THEN 740
730      GOTO 700
740      END

```

```

10  * PROGRAMA 1-8
20  * OBJ: PROGRAMAR PARA CALCULAR LA PRESION PARCIAL DE HIDROGENO A PARTIR
    LA ECUACION DE CUARTO GRADO
30  INPUT "COEFICIENTES SON LOS VALORES DE A",A
40  INPUT "COEFICIENTES SON LOS VALORES DE B",B
50  INPUT "COEFICIENTES SON LOS VALORES DE C",C
60  INPUT "COEFICIENTES SON LOS VALORES DE D",D
70  INPUT "COEFICIENTES SON LOS VALORES DE E",E
80  A=0
90  X=1
100 Z=(A*(X^4))+B*(X^3)+C*(X^2)+(D*X)+E
110 PRINT X,Z
120 IF -1.E-30<Z AND Z<1.E-30 THEN 270
130 Z=(A*(Xf^4))+B*(Xf^3)+C*(Xf^2)+(D*Xf)+E
140 PRINT Xf,Z
150 IF -1.E-30<Z AND Z<1.E-30 THEN 290
160 Xm=(Xf+X1)/2
170 Z=(A*(Xm^4))+B*(Xm^3)+C*(Xm^2)+(D*Xm)+E
180 PRINT Xm,Z
190 IF -1.E-30<Z AND Z<1.E-30 THEN 310
200 IF Z>0 THEN 240
210 Xf=Xm
220 Xm=(Xf+X1)/2
230 GOTO 160
240 X1=Xm
250 Xm=(Xf+X1)/2
260 GOTO 160
270 PRINT "X= ",X1
280 GOTO 320
290 PRINT "X= ",Xf
300 GOTO 320
310 PRINT "X= ",Xm
320 PRINT "Z= ",Z
330 END

```



```

10  ! PROGRAMA II
20  ! ESTE PROGRAMA CALCULA DIRECTAMENTE LAS PRESIONES PARCIALES DE: CO,CO2,H
20,CH4 A PARTIR DE I-A O I-B
30  DIM T(100),X(100),K1(100),K2(100),K3(100),K4(100),Y(100),Z(100),V(100),W(1
00),Q(100),H2(100),Ho(100),C2(100),Co(100),Ch(100)
40  PRINT "PARA K=1"
50  PRINT
60  K=1
70  INPUT "CUALES SON LOS VALORES DE O/H,ε,β ?",R,ε,β
80  FOR I=1 TO 28
90  PRINT "T( ; I; )","X( ; I; )","K1( ; I; )","K2( ; I; )","K3( ; I; )","K4( ; I;
";
100 INPUT T(I),X(I),K1(I),K2(I),K3(I),K4(I)
110 NEXT I
120 FOR I=1 TO 28
130 Y(I)=(2*K1(I))*((1-(.5*ε))-β-X(I))-(2*(X(I)^2))/K1(I)
140 Z(I)=(K3(I)*(ε+(2*β)-Y(I))*Y(I))/(X(I)+(2*K3(I)*Y(I)))
150 V(I)=(K4(I)*Z(I))^.5
160 W(I)=(X(I)^2)/K1(I)
170 Q(I)=X(I)+Y(I)+Z(I)+V(I)+W(I)
180 H2(I)=X(I)/Q(I)
190 Ho(I)=Y(I)/Q(I)
200 C2(I)=Z(I)/Q(I)
210 Co(I)=V(I)/Q(I)
220 Ch(I)=W(I)/Q(I)
230 NEXT I
240 K=2
250 PRINT "O/H,T,H0,H2O,CO2,CO,CH4"
260 FOR I=1 TO 28
270 PRINT R,T(I),H2(I),Ho(I),C2(I),Co(I),Ch(I)
280 NEXT I
290 IF K=1 THEN 70
300 PRINT "FIN DE PROGRAMA"
310 END

```

LIST

```

10 REM PROGRAMA III
20 REM ESTE PROGRAMA CALCULA DI
  RECTAMENTE LAS PRESIONES PAR
  CIALES DE: H2,CO,CO2,H2O Y C
  H4 MEDIANTE EL METODO II

30 REM DONDE LOS PRIMEROS VALOR
  ES DE A,B,C Y D SON LOS OBTEN
  IDOS EXPERIMENTALMENTE
40 DIM T(28),K1(28),K3(28),K4(28
  )
50 INPUT "CUALES SON LOS VALORES
  DE A,B,C,D ? ";A,B,C,D
60 PRINT : PRINT
70 FOR I = 1 TO 28
80 PRINT "CUALES SON LOS VALORES
  DE T(";I;"), ";K1(";I;"),
  ";K3(";I;"), ";K4(";I
  ");" ?"
90 INPUT T(I),K1(I),K3(I),K4(I)
100 NEXT I
110 FOR I = 1 TO 28
120 X = ( - 1 * (2 * A + K4(I)) /
  2) + (((((2 * A + K4(I)) ^ 2
  ) + (4 * (K4(I) * B - (A ^ 2
  )))) ^ .5) / 2)
130 A = A + X
140 B = B - X
150 REM AL=ALPHA
160 AL = (K3(I) * K4(I)) / A
170 Y = ((AL * D - C)) / (AL + 1)

180 C = C + Y
190 D = D - Y
200 CO = A
210 CO2 = B
220 H2 = C
230 H2O = D
240 CH4 = (C ^ 2) / K1(I)
250 NEXT I
260 PRINT "T          CO          CO2
          H2          H2O          CH4
          "
270 FOR I = 1 TO 28
280 PRINT T(I);CO;CO2;H2;H2O;CH4

290 NEXT I
300 END

```

B I B L I O G R A F I A

1. J.J. Moore, Recycling of non-ferrous metals, International Metals Review, 5, 241 (1978).
2. David R. Gaskell, Introduction to Metallurgical Thermodynamics. E. Mc. Graw-Hill. Ko Gakusha. L.T.D. (1973).
3. E. Frommand G. Hora, Hydrogen, Nitrogen, Oxygen, and Carbon in Metals, International Metals Reviews, 1980, No. 5 and 6 pag. (269-311).
4. N.J. Themelis and P. Spira, Flow Phenomena in Reverberatory Smelting, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 236 June 1966, pag. (821-827).
5. R.W. Dively, Cairman et Al. (ASM), Foundry Melting of Aluminum Alloys, Metals Handbook Vol. 5, 8th ASTM, pag. (389-398).
6. A. Murty Kanury, Introduction to Combustion Phenomena, Chemistry of Combustion. Ed. Gordon Breach, New York. pag. (8-42).
7. Allison Butts, A.B., B.S., Metallurgical Problems, Combustion, Ed. Mc. Graw-Hill, New York, 1943. pag. (13-52).
8. G.E. Macey, Preliminary Examination of Banbury's No. 5 Remelt Furnace, Alcan R. and D. Banbury. Report No. BP-PH 3/70.
9. G.E. Macey, Theoretical Predictions of Melting Furnace Performance, Alcan R. and D. Banbury. Report. No. Br-73/74.
10. J. Cuthbert and S.R. Wilson, Survey of No. 48 Remelt Furnace.
11. J. Cuthbert, K.T.W. Humphrey and R.E. Tapping, Survey of DC2 Remelt Furnace at Alcan Booth Sheat Limites: Kitts Gren, Alcanint: Banbury Report No. Br. 73/37.
12. W.R. Wilson, Comparison of Measured Performance of the Banbury No. 5 Remelt Furnace with Mathematical Model Predictions, Alcanint: Banbury, Report No. BP-PH 6/72.

13. W.R. Wilson and R.E. Tapping, Survey of Melting and Holding Furnaces at Aluminum Goods: Toronto, Alcanint: Banbury Report No. BTA 74/80.
14. W.R. Wilson and R.E. Tapping, Survey of Wellan Melting/Holding Furnaces at Lynemouth Sorbs with Special Reference to Fuel Consumption Alcanint: Banbury Report No. BTA 74/81.
15. C.A. Zapffe, Concept of Hydrogen Potential in Steam-Metal Reactions, Transactions of the ASM 1948, 40, pag. (315-354).
16. Roberts G. and Cary R., Tool Steels, Heat Treatments of Tool Steels (Control Atmospheres). pag. (147-149). Ed. American Society for Metals Ohio, 1980).
17. Koebel, N.K., Practical Application of Equilibrium Relationships to Heat Treatin in Controlled Atmospheres, Industrial Heatin Dec. (1954).
18. H.M. Heyn, Tool Steels, Heat Treatment of Tool Steels, pag. 148 (107-182). Ed. ASM, Ohio, 1980.
19. W.J. Reul-Heen u.a.: Sauerstoffeinsetz in aluminiumschmelzofen, ERZ. METALL 31, 1978 pag. (117-122).
20. Pierre Barrand y Robert Gadeau, Enciclopedia de Aluminio, Procesos de Conformado de Aluminio y sus Aleaciones, Vol. 4, Ed. URMO, 1974, (16-26).
21. Métodos Químicos para el análisis de minerales, Boletín No. 7, 3a. Edición, Comisión de Fomento Minero, México, D.F. 1968.
22. Brian Thompson, fundamentals of Gas Analysis by Gas Chromatography, Balancing Column Systems; Varia Associates, 1977, pag. (41-63).
23. IRNS and A.D. Tevebaugh, CHO Gas Phase compositions in Equilibrium with Carbon, and Carbon Deposition Boundaries at One Atmosphere, Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 9, No. 3 July 1954, pag. (453-462).
24. O.K. Chopra and K. Natesan Thermodynamic Equilibria of Multicomponent Gas, High Temperature Science 9, 243-262 (1977).

25. Adren G. Szekely, Das SNIF-Verfahren zur Entfernung von Verureinigungen aus aluminiumlegierungen, Erzmetall 31, 1978 pag. (110-117).
26. H. Aline Fine and Gordon H. Geiger, Handbook on material and Energy Balance Calculations in Metallurgical Processes. Ed. The Metallurgical Society of AIME, New York (1983).
27. J.J. Moore, Chemical Metallurgy, Metallurgical Thermodynamics, Co L.T.D., Ed. London Butterworth, 1981, pag. (34-96).
28. J.M. Smith, Chemical Engineering Kinetics, Thermodynamics Review, Ed. Mc Graw-Hill, Novaro 1965.
29. Obert and Young. Elements of Thermodynamics and Heat Transfer. Ed. Mc Graw Hill, New York (1965). pag. (296-317).
30. G. Kubaschewski and E. LL. Evans, Metallurgical Thermochemistry. Ed. John Willey and Sons. Inc., New York, 1956.
31. P. Souchay et All., Química Física-Termodinámica Química, Diagramas de sistemas Cuaternarios de Mezclas ternarias. Ed. Toray Masson. Barcelona (1972) pag. (280-318).
32. William C. Reynolds y Henry C. Perkins, Ingeniería Termodinámica, Ed. Mc. Graw-Hill, México, 1980, pag. (473-477).
33. L.F. Mondolfo, aluminum Alloys. Structure and Properties Butter Worths, ed. London-Boston, 343 (1979).
34. Chemical Engineering News 40, 23 (April 9, 1962).
35. Boll, R.H., Journal of Chem. Phys. 34, 1961, pag. 1108.
36. Brinkley, S.R., Jr., Ibid. 14, 1946, pag. 563.
37. Brinkley, S.R. Jr., Ibid 15, 147, pag. 107.
38. Brinkley, S.R., Jr., Lewis, B., U.S. Bur. Mines, Rrx, 1952 pag. (4805).
39. British, Gas Research Board Communications, Vol. 2, 1944, pag. (19-48).

40. Gryson, M., Demtter, J.J., Schelesinger, M.D., Johnson, G.E. Jonakin, J., Myers, J.W.U.S. Buredu of Mines ex 5/37, (1955).
41. Mayland, B.J., Hays, G.E., Chemical Engineering Progr. 45, 452 (1949).
42. Montgomery, C.W., Winberger, E.B., Hoffman, D.S., Isi Chemistry 40, 601 (1948).
43. Muraba, K., Kogyo Kagaku Zasski 64, 1782 (1961).
44. Naphtali, L.M., Journal of Chen. Phys 31, 963 (1959).
45. Newman, L.L., Ind. Eng. Chemistry 40, 559 (1948).
46. Potter, R.L., Vanderkulk, W., Journal of Chemistry and Phys. 32, 1504 (1960).
47. Vauck, Muller, Grundoperationen Chemischer Verfahrenstechnik, Veb. Deutscher Verlag Fur Grundstoffindustrie, (1978) Leipzig, D.D.R pag. (383-387).
48. T. Rosenquist, Principles of Extractive Metallurgy, Ed. Mc. Graw Hill, 1974, pag. (510-523).
49. K. Wefers, Properties and Characterization of surface oxides on Aluminium Alloys, aluminium, Vol. vo. 57, 722 (1981).