

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Rediseño de un Horno para Reciclaje de Metales con Ajustes a
Regulaciones Ambientales Municipales”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Franklin Marecelo Osorio Cobos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2005

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por permitirme cumplir una de mis metas.

Un agradecimiento muy especial a mi director TESIS Ing. Ignacio Wiesner, por su acertado asesoramiento y respaldo.

A mis amigos, Juan Real, Roger Wiesner, Luis Aguirre, por su apoyo y respaldo.

Y a todos que en alguna forma contribuyeron en la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres, Segundo Osorio,
Graciela Cobos y a mis
hermanos por brindarme su
apoyo durante todo este
tiempo

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Ernesto Martínez.
DELEGADO DEL DECANO
DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Omar Serrano V.
Vocal

Ing. Jorge Duque R.
Vocal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

Franklin Marcelo Osorio Cobos

RESUMEN

El proyecto de rediseño de un horno artesanal para reciclaje de metales tiene como finalidad mejorar la combustión del mismo para reducir las emisiones que procedan al quemar combustibles fósiles (CO_2 , CO_2 , Nox , SO_2)

Para propósito se realiza una evaluación de las emisiones y de la eficiencia de su operación, para posteriormente bajo las regulaciones Ambientales Municipales, proceder al rediseño del quemador, para obtener las mejoras requeridas en la combustión.

Con este proyecto se desea contribuir al mejoramiento del equipo de trabajo de los talleres artesanales que consumen aceites lubricantes, que es de peligrosa generación de dioxinas y furanos que se forman en la combustión. Además este equipo mejorado ayudaría a la conservación del medio ambiente tratando de evitar perjuicios relacionados con la combustión sin control, a saber:

- Disminución de la capa de Ozono
- Sobre calentamiento de la tierra

INDICE GENERAL

RESUMEN	II
INDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	IV
SIMBOLOGIA	V
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE PLANOS	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO 1

1. COMBUSTIBLES USADOS, EMISIONES GASEOSAS Y REGULACIONES MUNICIPALES.

1.1 Hornos artesanal para reciclaje de metales	3
1.2 Tipos de quemadores y combustibles	11
1.3 Evaluación de las emisiones	33
1.4 Regulaciones ambientales municipales para combustibles fósiles	36
1.5 Evaluación de la temperatura máxima.....	43
1.6 Evaluación de la eficiencia de los hornos artesanales.....	46

CAPITULO 2

2. REDISEÑO DEL HORNO DE CRISOL BASCULANTE

2.1 Diseño del Hogar	48
2.2 Cálculo de las paredes piso y tapa del horno	51
2.3 Mejoramiento del quemador para uso duplex de combustible	55
2.4 Cálculo, construcción y evaluación del impulsor del ventilador de alta presión	57
2.5 Instalaciones auxiliares de combustibles	54

CAPITULO 3

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

3.1 Evaluación del equipo con relación a las emisiones gaseosas	68
---	----

3.2 Evaluación del equipo con relación a la operación de fusión	71
---	----

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
--	-----------

APÉNDICE

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1	horno de foso	5
Figura 1.1.2	Hornos Bale-out (de espera)	6
Figura 1.1.3	Horno basculante de crisol	7
Figura 1.2.1	Tipos de quemadores	15
Figura 1.2.2	Tipos de quemadores de gas	16
Figura 1.2.3	Quemador de rotación con toroide	18
Figura 1.2.4	Quemador con abertura lateral escalonada	20
Figura 2.2.1	Esquema de las paredes del horno	54
Figura 2.4.1	Diagrama de las velocidades en el impulsor.....	59
Figura 2.4.2	Diagrama de velocidad iniciales.....	62
Figura 2.4.3	Diagrama de velocidades secundarias	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.2.1 Tipos de combustibles	19
Tablas 1.2.2 Densidad absoluta y relativa de combustibles comerciales (GLP).....	28
Tabla 1.2.3 Consumo de combustible	29
Tabla 1.3.1 Parámetros medidos para un sistema que utiliza aceite quemado	31
Tabla 1.3.2 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión	32
Tabla 1.4.1 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fundiciones de metales	36
Tabla 1.4.2 Límites para fundición de metales	38
Tabla 1.5.1 Temperaturas de trabajo.....	42
Tabla 1.6.1 Rendimientos térmicos relativos de diferentes tipos de hornos de crisol calentados con combustibles.....	44
Tabla 3.1 Evaluación de las emisiones	74
Tabla 3.2 Evaluación del equipo con relación a la operación de fusión	78

ABREVIATURAS

Al_2O_3	Alumina
mg/m^3	Miligramos por metro cúbico
NO_x	Oxido de Nitrógeno
m/s	Metros sobre segundos
SO_2	Dióxido de Azufre
CO	Monóxido de Carbono
GLP	Gas licuado de petróleo

SIMBOLOGIA

°C	Grados Centígrados
J	Joules
W	Watt
ppm	Partes por millón
Q	Flujo de calor
K	Grados kelvin
Mtr	Metros
r	Radio
t	Temperatura
V	Velocidad
w	Velocidad angular

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 .1 Esquema de un horno de foso	5
Figura 1.2 Esquema de Hornos Bale-out (de espera)	6
Figura 1.3 Esquema de horno basculante de crisol	7
Figura 1.4 Esquema horno basculante	15
Figura 1.2.1 Tipos de quemadores	16
Figura 1.2.2 Tipos de quemadores de gas	16
Figura 1.2.3 Quemador de rotación con toroide.....	18
Figura 1.2.4 Quemador con abertura lateral escalonada	20
Figura 2.2.1 Esquema de las paredes del horno	54
Figura 2.4.1 Diagrama de las velocidades en el impulsor.....	59
Figura 2.4.2 Diagrama de velocidad inicial.....	62
Figura 2.4.3 Diagrama de velocidades secundarias	63

INDICE DE PALNOS

Plano1.....	Implantación general
Plano 2.....	Diseño del Horno
Plano 3.....	Diseño del quemador
Plano 4	Diseño del Impulsor

INTRODUCCIÓN

En la actualidad un problema mundial que se ha generado desde la utilización de los recursos naturales como es el caso del petróleo y sus derivados, es la contaminación del medio ambiente por la utilización de estos productos principalmente en los procesos de combustión ya sea en los sistemas automotrices o en la generación de energía y en los desechos que estos producen al utilizarlos. Los contaminantes que son generados tienen un proceso lento pero muy peligroso para el medio ambiente lo cual es perjudicial para la humanidad, lo cual diferentes entidades han tratado de controlar estos procesos de contaminación por medio de leyes y regulaciones para un buen manejo, de dichos recursos.

En tesis anteriores ya se han resuelto el problema de mezclar aceite quemado con gas GLP y aire enriquecido con O_2 , ahora se aplica esta innovación a los hornos de fusión típicamente artesanales de alta capacidad de contenido de metal, para que se pueda corregir la practica actual de quemar los aceites sin ninguna tecnología que minimice el impacto ambiental.

Para la implantación de este proyecto se trabajo con las REGULACIONES AMBIENTALES MUNICIPALES para fuentes fijas, lo que nos indica los procesos de compra y utilización, los cuales permiten a dicha fabrica obtener los permisos correspondientes para la utilización de estos aceites. Además en el horno basculante se realizo el mejoramiento de los refractarios de las paredes y tapa, para así reducir las perdidas de calor y poder trabajar a altas temperaturas, para lo cual se utilizo materiales de alta alumina.

CAPITULO 1

1. COMBUSTIBLES USADOS, EMISIONES GASEOSAS Y REGULACIONES MINICIPALES

1.1 HORNOS ARTESANALES PARA RECICLAJE DE METALES

Clasificación de los hornos usado para la fusión

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto hasta 200 toneladas de capacidad. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinada por los siguientes factores:

- * Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
- * La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.

- * La producción requerida del horno.

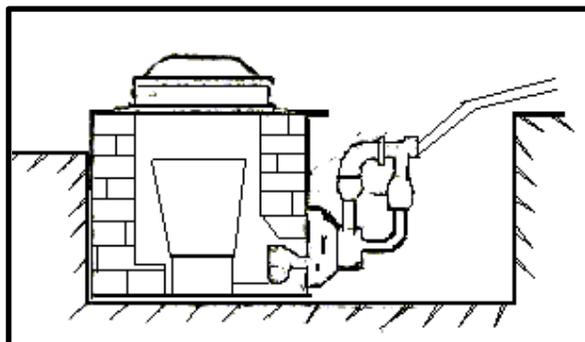
* El costo de operación del horno.

Tipos de horno de crisol

Los diferentes tipos de horno de crisol se pueden definir de la siguiente manera:

1) Hornos - pozo, figura 1.1.1: El crisol es removido del horno y llevado hasta los moldes para vaciar el metal. Este horno se puede construir sobre o bajo el nivel del suelo. En ambos casos el horno es fijo. Existen en una variedad de tamaño para acomodar crisoles desde 15 a 150 kg de capacidad de latón. Son extremadamente flexibles, tanto en relación a las aleaciones como a las cantidades. Se pueden usar crisoles distintos para diferentes aleaciones y, hasta cierto punto, crisoles de distinto tamaño en un mismo horno.

Figura 1.1.1

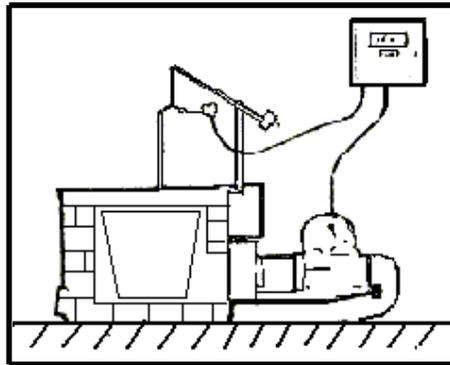


Hornos - pozo

2) Hornos Bale-out (de espera), figura 1.1.2: El metal es retirado del crisol con cucharas y transferido a los moldes. Se utilizan, principalmente, para fundición bajo presión, donde se necesitan pequeñas cantidades a intervalos frecuentes. Capacidades típicas en el rango de 50 a 500 kg de aluminio y 110 a 330 kg de latón.

Rendimiento máximo: 240 kg de aluminio por hora.

Figura 1.1.2

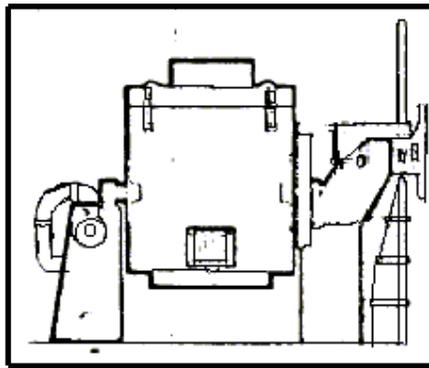


Horno de espera

2) Hornos Basculantes de crisol, figura 1.1.3: Son hornos móviles apoyados sobre un sistema de sustentación. Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente. El tipo original de horno basculante, con capacidades de 70 a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central. Su desventaja es que el punto de

descarga acompaña el movimiento basculante. Para superar este inconveniente se desarrolló un horno basculante de eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado.

Figura 1.1.3



Horno basculante

Cuando se encienden los hornos de crisol basculables se calienta el crisol vacío, al principio suavemente, con la menor llama posible que puedan dar los quemadores durante los primeros 10 min. Después se aumenta por etapas la velocidad de calentamiento hasta, que el crisol se ponga al rojo, en cuyo momento se le carga y se pone el quemador al máximo. El tiempo necesario para llevar los crisoles al rojo debe ser de, aproximadamente 30 min. para capacidades de hasta 300 Kg. de

latón, 45 min. para 450 a 700 Kg. de latón o 225 Kg. de aluminio y de 75min para 450 Kg. de aluminio.

Los crisoles deben cargarse con el horno vertical, empleando tenazas suficientemente largas para que puedan llegar al fondo del crisol.

1.2 TIPOS DE QUEMADORES Y COMBUSTIBLES

Quegador.- Es la unidad que indica la combustión. Para el caso de combustibles líquidos debe proveer la inyección de combustible por medio de insuflamiento de aire. Provee también el espacio para atomización y mezcla previa, así como para la combustión.

Un quemador ideal debe cumplir ciertas especificaciones básicas:

1. Permitir alcanzar una temperatura controlada uniforme en el horno.
2. Permitir obtener una atmósfera controlada y uniforme en el horno.
3. No debe deteriorarse debido al calor generado.

Dichos principios son sencillos pero difíciles de obtenerlos ya que si la temperatura del horno es bastante uniforme, la atmósfera del horno no se mantiene constante. Para nuestro caso vamos a utilizar quemadores de combustibles mixtos, ya que es el tipo que se desarrolla en nuestro proyecto.

1. Después de vaporizarse, con obtención de combustión similares a las de las combustiones gaseosas.

2. Después de que el combustible se atomice, bajo el efecto del calor transmitido por las paredes y los gases calientes contenidos en la cámara de combustión, se evaporan y arden instantáneamente.

Quemadores a Diesel

Los quemadores fósiles solo pueden ser quemados por dos formas:

1. Vaporizarlos antes de la ignición, y así poder quemarlos como si fuera gas.

2. Rompiéndolos en finas gotas las cuales serán inyectadas hacia el aire caliente, los que serán inyectadas hacia el aire caliente, los que serán evaporadas mientras son quemadas.

En el primer caso el combustible debe ser refinado, o de alta volatibilidad y no debe ser bituminoso o sea no debe ser pasado, denso e impuro. Este tipo de combustible no es muy utilizado en la escala industrial.

En el segundo caso, el combustible fósil líquido es calentado para tener una viscosidad adecuada baja y luego atomizada.

La atomización se puede dar por los siguientes métodos:

- a) Mecánicos, por medio de un disco rotatorio una curvatura o un vértice.
- b) Por la inyección de alta presión de un pequeño orificio
- c) Por arrastre en una corriente de aire o vapor

Estos quemadores difieren tanto en el tamaño de las gotas como de la forma de la boquilla del quemador. Cuando la atomización es mecánica se da un ancho rociado del combustible y por ende ancha llama, pero las gotas que se forman son de tamaño uniforme (50μ). En cambio cuando se atomiza el combustible por medio de las altas presiones el resultado es un rociador en forma cónica. Y por último

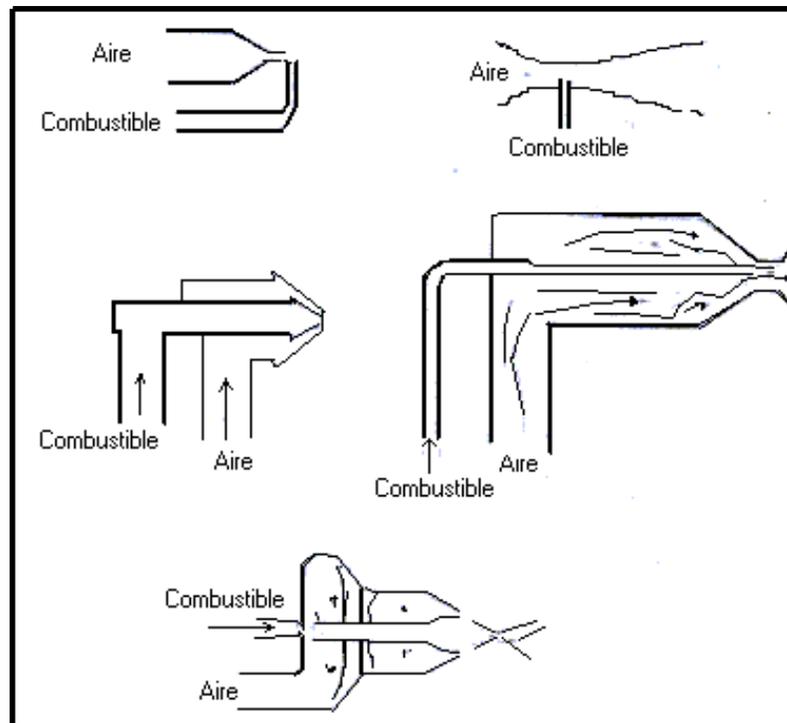
cuando es por medio de corriente de aire, se produce un chorro corto (narrow jet) y una llama puntiaguda y larga, y produce las gotas mas variadas de las tres.

En la figura 1.2.1 se puede observar algunos tipo de quemadores que se utilizan combustible liquido, Los quemadores en si son simples y robustos, pero sus dimensiones y ángulos deben ser diseñados cuidadosamente y con preescisión.

En la figura 1.2.1 se presentan diferentes tipos de quemadores:

- a) tipo rociador,
- b) quemador tipo ventura,
- c) quemador de corriente de alta presión (boca angosta),
- d) quemador de corriente de baja presión (boca angosta),
- e) rociador mecánico del combustible por medio de una copa manejada por un impulsor de aire; el aire se vaporiza y luego rompe en finas gotas; la copa puede ser manejado eléctricamente,
- f) La forma de la nariz puede ser hecha para inducir vértices,
- g) Los vértices dan el combustible una expansión adicional.

Figura 1.2.1



Tipos de quemadores

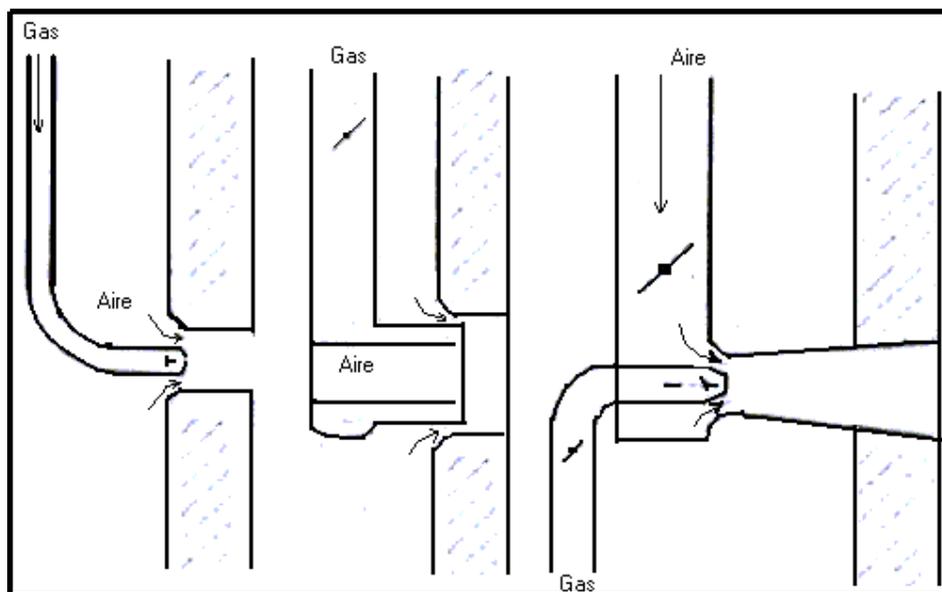
Cuando un combustible es atomizado, significa que es dividido en pequeñas gotas de combustibles. En un horno caliente, estas pequeñas partículas de combustible serán parcialmente evaporadas para formar gases, los cuales si son mezclados con la cantidad correcta de aire, serán quemados súper rápido. Al mismo tiempo para que la combustión y la vaporización ocurran en una rápida sesión, los quemadores deben proveer un mezclado del combustible atomizado con el aire.

La atomización de los combustibles fósiles requiere de energía mecánica, la que puede ser por medio de presión o por medio de aire o vapor. Cuando la atomización se la realiza por medio de presión, esto implica que se fuerza al combustible bajo una alta presión a través de un pequeño orificio, la tobera esta diseñada de tal forma que el rociador es producido.

Quemadores de gas

Muchos quemadores domésticos y algunos industriales usan llamas estabilizadas en la tobera, en una modificación del quemador Bunsen tradicional (Figura 1.2.2).

Figura 1.2.2



Quemadores de Gas

El gas combustible induce su propia provisión de aire por un proceso de eyector regulado por el registro), y los reactantes están premezclados al llegar a las toberas de quemado. La llama es estabilizada por la pérdida de calor al cuerpo del quemador.

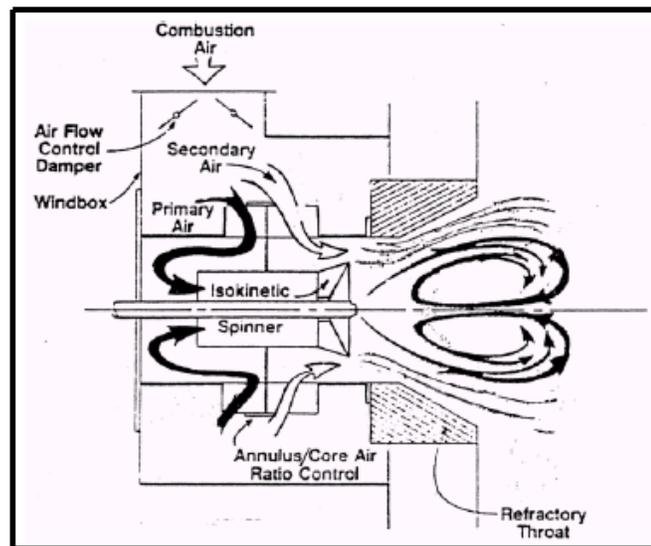
En estos quemadores son de especial interés los problemas de:

- Velocidad de la llama
- Estabilización de la llama (soplado y retroceso)
- Radiación
- Ruido
- Emisión de contaminantes, especialmente NOx.

Quemadores con rotación

Muchos quemadores de hornos y calderas, a gas o a gasoil, producen llamas estabilizadas por rotación. El aire, que es forzado por un soplador, recibe un movimiento de rotación que sirve para estabilizar una zona de recirculación toroidal en el centro del vórtice. El toroide de recirculación promueve la mezcla y reduce la velocidad del flujo, estabilizando la llama (Figura 1.9).

Figura 1.2.3



Quemador industrial con rotación y toroide de recirculación

Los puntos de interés incluyen:

- Estabilidad de la llama
- Evaporación y quemado de gotas (gasoil y fueloil)
- Mezclado de aire y combustible
- Largo de la llama

- Radiación
- Emisión de contaminantes, particularmente NOx y humo/ hollín.

Quemador con abertura lateral escalonada.

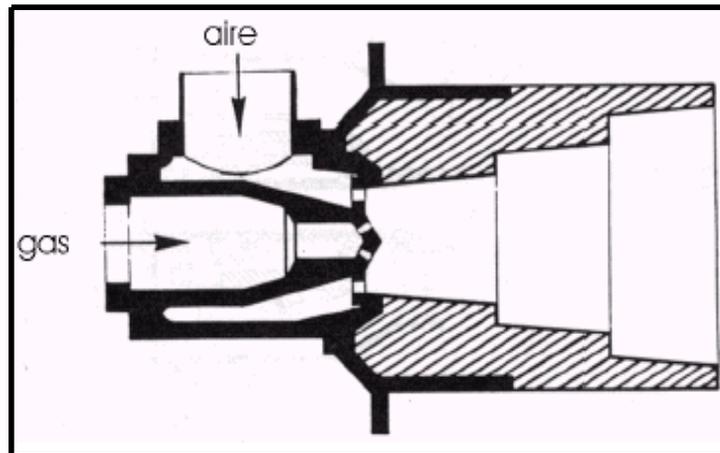
Este tipo de quemador, de aparición reciente, está alimentado por aire y por gas en escurrimientos convergentes, pero su particularidad reside en la forma de la abertura lateral.

Éste, en lugar de estar constituido por un único tronco de cono, se conforma con varios sucesivos, cuyas secciones van en aumento. Esto permite obtener una gran variación de sección de salida sin tener una salida lateral muy ensanchada y manteniendo la llama retenida sobre su contorno.

Tales quemadores, que existen para potencias importantes, tienen un rango más elevado que los de abertura lateral cónica simple ya que en ellos supera largamente el valor de potencia de otros quemadores.

A raíz de su novedad, su dominio de utilización no está todavía completamente delimitado.

Figura 1.2.4



Quemador con abertura lateral escalonada

Quemadores duales: Diesel y GLP.

Los quemadores mixtos han sido desarrollados para permitir simultáneamente la quema de gas junto al combustible líquido o a carbón pulverizado, en una cantidad suficiente para producir la energía requerida.

Estos quemadores son una fusión entre los quemadores a diesel con los quemadores a gas. En este caso también es importante la atomización o vaporización del combustible líquido.

La atomización se la puede lograr de dos métodos:

1. El gas y el aire pueden ser premezclados fríos y quemados al final de la cámara de premezclado. En general una parte del aire necesario es mezclado con el gas.

2. El gas y el aire fluyen hacia el horno separadamente y se mezclan juntos mientras la combustión prosigue, este procedimiento a veces se llama difusores de llama.

El quemador tipo uno es usado en pequeñas cantidades donde se necesita el mejor control de temperatura. En este tipo de quemador, el aire es arrastrado por gas que sale por un orificio a alta velocidades, generando vacío a la entrada de aire, y de esta forma lo arrastra y se mezclan con el gas.

En el arreglo mas simple el dos, consiste en admitir el aire y el gas hacia la cámara de combustión a través de puertos separados, los que usualmente están adyacentes uno a lado del otro, lo cual permite que estos dos se mezclen en el horno. La tasa de mezclado, la forma y el tamaño de la llama son determinados por el diseño de los puertos, la velocidad relativa del gas, la corriente de los gases, ángulo de convergencia, entre otros. Con esta forma de quemado de gas, se obtiene llamas alargadas, con movimientos relativamente lentos de las

llamas y es muy utilizado en el encendido del hogar del horno para fusión de aceros. Se pueden utilizar otras condiciones las cuales favorecen a los quemadores tipo puerto, son la utilización de aire y gas precalentado que igniciona cuando es mezclado, ya que sea el gas combustible sucio, y cuando se necesita llamas largas y lentas.

Clasificación de combustibles

Combustibles Industriales

Los combustibles en general se pueden clasificar en tres tipos: sólidos, líquidos y gaseosos. Además dentro de esta división, cada tipo se puede clasificar ya sea en combustibles naturales o primarios y en combustibles manufacturados o secundarios, según sea su origen. La tabla 1.2.1 agrupa dicha clasificación.

Combustibles líquidos

Los combustibles líquidos industriales como la nafta, el kerosene, el gas oil, el kerosene, el diesel oil, son productos que se obtienen por destilación fraccionada o por destilación destructiva (Cracking) del petróleo bruto.

Tabla 1.2.1

Tipos de combustibles

TIPO	Combustibles	
	Naturales	Manufacturados
LIQUIDOS	Petróleo	Alquitrán de hulla Destilados de petróleo Residuos de Petróleo Alcoholes Combustibles coloidales
GASEOSOS	Gas Natural	Gas para alumbrado Gas de horno de Coque Gas pobre Gas de petróleo Gas de Alto Horno Acetileno

Los petróleos crudos son mezclas muy complejas que consisten sobre todo de hidrocarburos y en compuestos que contienen azufre, nitrógeno, oxígeno, trazas de metales como constituyentes menores y otras veces una alta proporción de agua capaz de formar emulsiones.

Los principales productores de petróleo en el mundo son: EE.UU., Venezuela, México, Argentina, Colombia, Trinidad, Perú, Rusia, Rumania, Irán Indias Holandesas, Irak.

De la composición porcentual de los elementos del petróleo crudo el azufre es el más perjudicial, se dan casos en que el contenido de azufre es de 6 %, puede estar presente como azufre libre, disuelto o combinado con el hidrógeno formando ácidos, sulfuros y sulfatos, estos últimos pueden no existir en el petróleo crudo pero se forman durante el craques. El problema de los compuestos sulfurados es la corrosión de las cañerías y recipientes en general, además al efectuarse la combustión de los aceites combustibles provoca el problema de corrosión de baja temperatura (explicado anteriormente).

Combustibles gaseosos

El principal inconveniente que presentan los combustibles gaseosos deriva del enorme volumen que ocupan. En efecto, un metro cúbico de combustible gaseoso (a 0 °C, 760 mmHg) tiene un poder calorífico que varía desde 900 (gases de altos hornos) hasta 1700 calorías (gases de refinería de petróleos). El promedio de este poder calorífico en un combustible sólido o líquido ocupa un volumen del orden de un litro es decir, que para almacenar cantidades iguales de calor en

combustibles gaseosos a la presión atmosférica, habría que disponer de un volumen del orden de 1000 veces superior que con los combustibles sólidos o líquidos, volumen que deberían cerrarse en recipientes herméticos, para disminuir este volumen el gas se podría almacenar a presiones elevadas y esto encarecería el costo del recipiente demasiado. Por esta razón, los combustibles gaseosos artificiales deben usarse a medida que se producen, y no acumular más que una pequeña parte para compensar las variaciones del consumo momentáneas. En las industrias de gas para distribuciones urbanas, el volumen de los gasómetros no alcanza en general a cubrir el volumen el consumo diario. El gas natural que sale en abundancia de los yacimientos petrolíferos hay que captarlos y transportarlos por medio de grandes cañerías a presión hacia los centros de consumo, donde se va consumiendo a medida que llega, por esta razón a veces se dejan escapar grandes cantidades de gas natural.

A diferencia de los combustibles sólidos y líquidos cuyas cantidades se evalúan en peso, los combustibles gaseosos se evalúan en volumen, el cual se refiere siempre a una temperatura y presión determinada. Durante el proceso de combustión la presión suele variar comparativamente poco en todo el circuito desde el hogar hasta el conducto de escape de los gases resultantes de la combustión, en

cambio la temperatura varía enormemente así una misma cantidad de gases ocupa sucesivamente volúmenes muy distintos a medida que se calienta y enfría y esto se tiene en cuenta al calcular la sección de los conductos y la capacidad de los ventiladores.

La clasificación de los gases combustibles industriales, considerando orden de importancia son: los gases naturales, los obtenidos en la refinación del petróleo, el gas de gasógenos, el gas de altos hornos, los gases licuados, acetileno, e hidrógeno.

Características de combustibles gaseosos:

Los combustibles gaseosos se clasifican, según normas internacionales.

La primera familia comprende los gases manufacturados y se subdivide en tres grupos; la segunda familia incluye a los gases naturales, y también se subdivide en dos subgrupos; finalmente, la tercera familia comprende a los gases licuados del petróleo (GLP), es decir, propano, butano y sus mezclas.

Los combustibles se clasifican teniendo en cuenta su estado de agregación en sólidos, líquidos y gaseosos. Un ejemplo de

combustible sólido es el carbón o la madera. Un ejemplo de combustible líquido es el diesel, y de combustibles gaseosos, el propano y el gas natural.

Los combustibles fósiles son aquellos que provienen de restos orgánicos vegetales y animales y se extraen de la naturaleza. Un ejemplo es el petróleo, que si bien es un combustible, no se utiliza directamente como tal, sino como excelente materia prima de muchos combustibles, como el kerosene o las naftas.

En la actualidad existen procesos en los cuales utilizan aceites quemado de maquinas, por su poder calorífico y principalmente por su bajo costo

Conceptos básicos

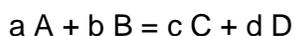
La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente más usual.

Si se supone (caso más común) que la combustión se realiza con aire, la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual

el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir,

Combustible + Aire = Productos

Una forma general de plantear una reacción química es la siguiente:



donde las letras escritas en mayúsculas indican las sustancias químicas y las minúsculas indican la cantidad de moles de dichas sustancias.

Se denominan genéricamente reactantes a las sustancias escritas antes del signo igual (A y B) y productos a las escritas detrás (C y D).

Como se indicó anteriormente, la combustión es una reacción de oxidación exotérmica. Esto significa que durante la reacción se libera calor. La variación de entalpía que acompaña a la combustión completa de un mol de un compuesto se denomina calor de combustión. Este calor de combustión puede determinarse tanto en forma experimental como por medio de cálculos (teniendo en cuenta las entalpías de los reactivos y productos).

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO_2 y H_2O . A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20.99% de O_2 , 78.03% de N_2 , 0.94% de Ar (argón), 0.03% de CO_2 y 0.01% de H_2 . Debido a que ni el N_2 ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el aire está formado por 21% de O_2 y 79% de N_2 .

Por lo tanto, el N_2 pasará íntegramente a los humos. Se puede dar el caso en que el combustible esté formado por una mezcla de sustancias entre las cuales hay una o más que no reaccionan con el O_2 , por ejemplo SO_2 . En este caso, estas sustancias también pasarán en forma completa a los humos.

Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O_2 que no se

utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire.

Por último, es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO.

Cuando el O₂ que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire.

Propiedades de los combustibles

Las propiedades más importantes que caracterizan a los combustibles son:

- * Composición
- * Poder calorífico
- * Viscosidad
- * Densidad
- * Límite de inflamabilidad
- * Punto de inflamabilidad o temperatura de ignición
- * Temperatura de combustión
- * Contenido de azufre

Composición

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la reacción de combustión. Además, establece si el mismo es apto o no para el uso que se requiere, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes.

La forma habitual de indicar la composición de un gas es como porcentaje en volumen de cada uno de sus componentes.

Los componentes más habituales en un combustible gaseoso son:

- Hidrocarburos, de fórmula genérica C_nH_m
- Dióxido de carbono: CO_2 .
- Monóxido de carbono: CO .
- Hidrógeno: H_2 .
- Oxígeno: O_2 .

- Nitrógeno: N₂.
- Dióxido de azufre: SO₂.
- Sulfuro de hidrógeno: SH₂.
- Vapor de agua: H₂O.

Tablas 1.2.2

Densidad absoluta y relativa de combustibles comerciales (GLP).

Gases combustibles	Densidad absoluta(Kg/m ³)	Densidad relativa
Gas Natural	0.802.	0.62
Butano comercial	2.625	2.03
Propano comercial	2.095	1.62

Se muestran valores medios orientativos de las densidades de los principales combustibles gaseosos.

Consumo de combustible

La tabla 1.2.3 presenta la cantidad de combustible que se utiliza en el horno.

Tabla 1.2.3**Consumo de combustible**

Combustible	Combustible liquido (gal/h)	Combustible gaseoso (Kg/h)	Combustible (KJ/h)
Aceite +GLP+aire con O ₂ al 30%	8,1	32.4	360204,636

Sin la implementación en el horno se trabajaba con 12 galones por hora de trabajo. Pero si mezclamos el aceite con GLP y lo enriquecimos con aire con 30% O₂ esto hace que el consumo de aceite disminuya en un 67%, lo que generamos una disminución en el consumo en 8,1 galones por hora de trabajo.

Estas mediciones y combinaciones fueron tomadas de la tesis base donde ya se experimento con diferentes tipos de combustibles, teniendo en cuenta parámetros como reducción en el tiempo de fusión, disminución de los contaminantes generados al medio, y puede decirse que este es un sistema ambientalmente sustentable por la mejora del proceso del horno.

1.3 Evaluación de las emisiones

La evaluación se dará con los gases y partículas emitidas al medio ambiente por el horno, para este proceso es la estimación de obtener valores referenciales en cuanto a las concentraciones emitidas al medio ya sea de contaminantes o de gases de efecto invernadero se puede observar en la tabla A (anexos).

Para nuestro caso vamos a utilizar las reglamentaciones ambientales municipales las cuales están descritas en el siguiente capítulo, las que permiten a las empresas de Guayaquil la reutilización de los desechos de aceites lubricantes utilizarlos en forma de combustibles, lo cual se trata de cumplir aplicando los métodos del mejoramiento del horno.

En la tabla 1.3.1 presentaremos para conocer las emisiones emitidas del horno al utilizar solo aceite más aire y de la implantación de: aceite + GLP + oxígeno enriquecido al 30%.

Tabla 1.3.1

Parámetros medidos para un sistema que utiliza aceite quemado

PARAMETROS MEDIDOS	Aceite – Aire	Aceite –GLP, aire Enriquecido con	Unidades
-------------------------------	--------------------------	--	-----------------

		O₂ (30%)	
Óxidos de Nitrógeno - NO _x	161,0 (331)	84,3 (173,0)	ppm (mg/m ³)
Dióxido de Azufre - SO ₂	227,7 (650)	137,3 (392,0)	ppm (mg/m ³)
Monóxido de Carbono -CO	233,9 (292)	200,8 (251,0)	ppm (mg/m ³)
Temperatura de llama	1212	1450	°C
Temperatura del horno	962	1200	°C

Tabla 1.3.2
Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes
fijas de combustión. Norma para fuentes en operación a partir de
Enero de 2003

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	150	mg/m ³

	Líquido ^[2]	150	mg/m ³
	Gaseoso	No	No
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/m ³
	Líquido ^[2]	550	mg/m ³
Dióxido de Azufre	Gaseoso	400	mg/m ³
	Sólido	1 650	mg/m ³
	Líquido ^[2]	1 650	mg/m ³
	Gaseoso	No	No
		Aplicable	Aplicable

Para efecto de una evaluación podemos realizar comparaciones de las emisiones generadas del horno antes de la utilización de este método, y las emisiones al implementar este proceso, y de las emisiones permitidas por las regulaciones ambientales. Según la tabla D (anexos)

1.4 REGULACIÓN AMBIENTAL MUNICIPAL PARA COMBUSTIBLES FÓSILES

“ORDENANZA QUE REGLAMENTA LA RECOLECCIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE ACEITES USADOS”.

ARTICULO PRIMERO: ÁMBITO.- El ámbito de aplicación de la presente ordenanza comprende a todas las personas naturales y jurídicas, públicas y privadas o de economía mixta que como consecuencia de su actividad económica o particular traten con aceites y grasas lubricantes ya sea mediante su comercialización, utilización o prestación de servicios de mantenimiento de automotores, vehículos, motores estacionarios, maquinaria o equipo industrial que, generan aceites usados y/o grasas lubricantes usadas, provenientes del mantenimiento de todo tipo de maquinaria, pesada o liviana, motores de combustión y de sistemas de transmisión, en cualquier actividad dentro del Cantón Guayaquil.

Disposición Final: Es la acción de depósitos permanentes de los desechos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños a la salud y al ambiente. (Definición del Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación y Desechos Peligrosos).

ARTÍCULO OCTAVO: DE LOS SITIOS DE TRATAMIENTO FINAL DE LOS ACEITES USADOS.- Las personas naturales y/o jurídicas autorizadas para la disposición final por la Corporación Municipal de los aceites usados y/o grasas lubricantes usadas, no podrán destinarlos a otros y otros usos que no sean la destrucción de dichos aceites usados y/o grasas lubricantes usadas que reciben, pudiendo en dicho proceso aprovecharlo como combustible acorde a los parámetros técnicos internacionales que aprueben la Corporación Municipal as través del Alcalde, previo informe favorable del Director de Medio Ambiente.

Las áreas donde se ubiquen los depósitos para la disposición final de aceites usados y/o grasas lubricantes usadas, sin perjuicio de las normas técnicas internacionales que se indique por la Corporación Municipal, deberán constar con:

- a) Existencia de techo;

- b) Facilidad para maniobra de carga y descarga;
- c) Impermeabilidad en el piso;
- d) No debe existir conexión alguna con el sistema de alcantarillado o de agua;
- e) Disponer de un canal o dique perimetral que sirva de conexión en caso de desborde o siniestro;
- f) Contar con medidas para control de aceite;
- g) Identificación de los tanques, según los diferentes residuos almacenados; y;
- h) Los que se consideren necesarios, la Corporación Municipal sobre la base del análisis de la Dirección de Medio Ambiente.

ARTÍCULO DÉCIMO: EL TRANSPORTE.- El transporte de los aceites usados y/o grasas lubricantes usadas, deben efectuarse de conformidad con las disposiciones legales, internacionales aplicables, reglamentarias, y municipales vigentes para el transporte de residuos peligrosos, cuyas características deberán constar en la petición de licenciamiento ambiental que se presente para el proceso de recolección, transporte y/o disposición final.

DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS ACEITES USADOS

ARTÍCULO DÉCIMO PRIMERO.- Los aceites usados para su incineración se podrán mezclar con otro tipo de combustible en cualquier proporción en hornos, cuya temperatura de proceso sea al menos de 850 grados centígrados.

ARTÍCULO DÉCIMO SEXTO.- El aceite lubricante usado en hornos tendrán como límites permisibles contaminantes en los gases emitidos lo siguiente:

Partículas totales: 355 mg/m³

Oxígeno de Nitrógeno No. 2) 700 mg/ N m³

Dióxido de Azufre (SOL) 1650 mg/ mm³)

La persona natural o jurídica que cuente con licencia ambiental para la disposición final de aceites o grasas lubricante usadas, deberá monitorear y presentar a la Dirección de Medio Ambiente, los resultados de caracterización de emisiones contaminantes normada en el artículo precedente en períodos semestrales durante los dos primeros años de operación con la licencia ambiental, y en periódicos mensuales a partir del tercer año de licenciamiento.

REQUISITOS

De los límites permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión

De las fuentes fijas significativas de emisiones al aire

* Serán designadas como fuentes fijas significativas todas aquellas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos, o cualquiera de sus combinaciones, y cuya potencia calorífica (heat input) sea igual o mayor a tres millones de vatios (3×10^6 W), o, diez millones de unidades térmicas británicas por hora (10×10^6 BTU/h).

* Valores máximos permisibles de emisión

Los valores de emisión máxima permitida para la fusión de metales, para fuentes fijas de combustión, son los establecidos en la Tabla 1.4.1

Fundición de metales

Tabla 1.4.2

Límites para fundición de metales

Tabla C

Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión. Norma para fuentes en operación a partir de Enero de 2003

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	150	mg/m ³
	Líquido [2]	150	mg/m ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/m ³
	Líquido [2]	550	mg/m ³
	Gaseoso	400	mg/m ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/m ³
	Líquido [2]	1 650	mg/m ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

NORMA DE CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE

De los planes de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire

* La Entidad Ambiental de Control establecerá un Plan de Alerta, de Alarma y de Emergencia ante Situaciones Críticas de Contaminación del Aire, basado en el establecimiento de tres niveles de concentración de

contaminantes. La ocurrencia de estos niveles determinará la existencia de los estados de Alerta, Alarma y Emergencia.

* Se definen los siguientes niveles de alerta, de alarma y de emergencia en lo referente a la calidad del aire Tabla B (anexos). Cada uno de los tres niveles será declarado por la Entidad Ambiental de Control cuando uno o más de los contaminantes comunes indicados exceda la concentración establecida en la siguiente tabla, o cuando las condiciones atmosféricas se espera que sean desfavorables en las próximas 24 horas.

1.5 Evaluación de la temperatura máxima

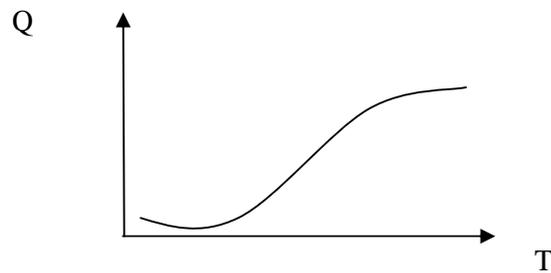
Temperatura de Llama.- Esta depende de poder calorífico PC y del exceso de aire EA. Si no hubiese pérdidas térmicas (tanto acumuladas en paredes, perdidas al exterior y transferidas a la carga térmica) se lograría la denomina Temperatura Adiabática de Llama.

$$\text{Tasa-Del- E} = (\text{m-flujo}) \times \text{Cp} \times (\text{Tg} - \text{Ta})$$

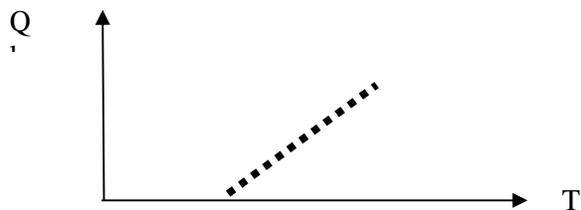
Donde Tasa-Del-T significa tasa de cambio de energía almacenada (flujo de energía), Tg es temp de gases y Ta es temp de entrada de aire.

Ignición.- La ignición estable se produce cuando la mezcla combustible libera al inflamarse, suficiente cantidad de energía para vencer las pérdidas térmicas.

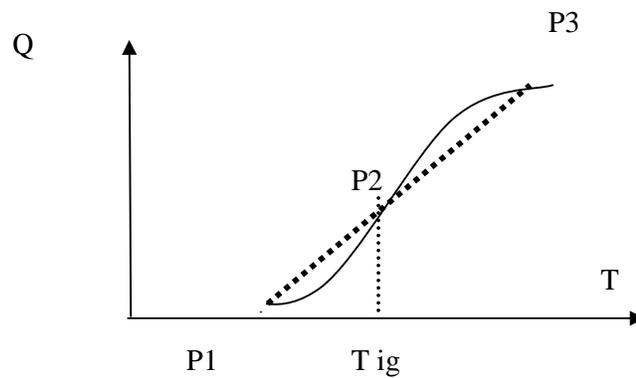
Se aplica de manera aproximada el principio de la explosión térmica. Se asume que la curva de generación e calor con temperatura tiene forma sigmoidal (exponente con punto de inflexión



Mientras que la pérdida de calor puede asumirse lineal (en práctica es algo exponencial)



El punto de operación se da donde se intersecta la curva



P1= Punto de oxidación imperceptible

P2= Punto de combustión estable

P3= Punto de Ignición.

La temperatura debe llegar a Tig (P2) para que se desencadene la combustión estable y se arribe al punto de P3 de operación estable.

Donde se trabaja es un horno basculante de crisol removible, el cual trabaja para fusión de materiales ferrosos y no ferrosos, las temperatura que se utilizan para esto están alrededor de $900^{\circ}\text{C} - 1400^{\circ}\text{C}$, temperatura la cual se avenida trabajando, pero el tiempo para llegar a estas temperaturas eran largos. Para una evaluación de la temperatura máxima en el horno y en la llama podemos hacer una evaluación de la

temperatura que se podían llegar y a las que con el nuevo procedimiento se generan.

La toma de temperatura se la realizo el horno sin carga y cuando llego a un estado estable.

Tabla 1.5.1

Temperaturas de trabajo

	LLAMA (°C)	HORNO (°C)
HORNO(sin implementación)	1212	962
Horno(con implementación)	1450	1200

1.6 Evaluación de la eficiencia de los hornos artesanales

Se debe tener en cuenta que los hornos de este tipo carecen de tecnología en los procesos de fundición, los cuales hacen q su eficiencia sea muy baja, ya que existen perdidas de temperatura por que no tiene recubrimientos, o recuperadores de calor debido a sus costos elevados, los cuales podrían hacer que aumente sus eficiencias y mejorar los

procesos haciendo que los costos de fundición por hora de trabajo disminuyan.

De ahí que este nuevo método que se implementado reduce el tiempo de trabajo.

En esta tabla nos indica los resultados técnicos, por acción de combustibles para diferentes hornos

La eficiencia del horno, se toma en cuenta según el tiempo de operación que necesita para que el material se funda a la temperatura desea y a la cantidad de combustible consumida por hora de trabajo.

Tabla 1.6.1**Rendimientos térmicos relativos de diferentes tipos de hornos de crisol
calentados con combustibles**

Tipo de horno	Rendimiento térmico
Horno de crisol de foso,	3 a 7 %
Horno de crisol basculable,	8 a 13 %
Horno de crisol basculable, calentado con aceite o gas.	7 a 18 %

CAPITULO 2

2. REDISEÑO DEI HORNO DE CRISOL BASCULANTE

2.1 Diseño del hogar

Movimientos de los gases en los hornos

La dinámica de la combustión debe considerar los siguientes aspectos:

- * Teoría sobre las llamas, intensidad de llama.
- * Criterio de Bragg para cámaras de combustión
- * Teoría de la cámara de combustión

Teoría de llama

La llama puede ser definida como una zona de reacción en la que ocurre la oxidación con emisiones de calor y de generación de luz.

Los tipos de llama se clasifican de acuerdo a:

- * Estado físico de la mezcla

- * Condiciones fluido dinámico de la corriente

- * Posición relativa a un marco de posición

- * Tipo de combustible

Criterio de Bragg para el diseño de cámaras de combustión

El criterio de Bragg para el diseño de cámaras, expresa que para que se produzca una buena combustión la cámara deberá contar con dos secciones (espacios):

La primera de “flujo perfectamente mezclado” o algo que se aproxime y en el segundo una sección de “flujo paralelo”.

En la primera sección se produce del 60 al 70% de la combustión y sirve para producir la ignición y la estabilidad de la llama y permite la mezcla de los reactantes cuando estos vienen en corriente separadas.

No es aconsejable que esta primera zona se extienda a toda la cámara por varias razones:

Mezclaría los productos de la combustión con la mezcla fresca, y se genera más reacciones secundarias y las principales son la producción de NO_x y SO_x , además la turbulencia en esta zona produce la erosión en la cámara.

Típicamente la zona de flujo perfectamente mezclado ocupa el 1/3 de la cámara mientras que la sección de flujo paralelo los otros 2/3.

Cálculos:

Para nuestro caso el diseño de la cámara se la realizo por medio de comparaciones de la intensidad de llama en diferentes tipos de hornos, el cual nos permite obtener una parámetro con el que vamos analizar la intensidad de esos hornos y compararlos con nuestro diseño.

$$I = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

I = intensidad de llama

Q = Calor generado por el horno

V = volumen libre de la cámara de combustión.

Para un horno de tratamiento térmico que utiliza gas como combustible, con un volumen de la cámara de $0,537 \text{ mtr}^3$, y con calor generado de $Q = 296489,19 \text{ KJ/h}$.

$$I = \frac{296489,19 \text{ KJ/h.}}{0,57 \text{ mtr}^3} =$$

$$I = 0,5201 \text{ E6 } \frac{\text{KJ} * \text{mtr}^3}{\text{h}}$$

El segundo horno que analizamos es un horno para fundición de bronce, con un volumen de la cámara en vacío de $V = 0,25 \text{ mtr}^3$, y con un calor entregado de $Q = 260003 \text{ KJ/h}$

$$I = \frac{260083 \text{ KJ} / \text{h}}{0,25 \text{ mtr}^3}$$

$$I = 1,04 \text{ E6 } \text{KJ} * \text{mtr}^3 / \text{h}$$

Para, nuestro horno tenemos un volumen de la cámara en vacío de $0,160 \text{ mtr}^3$, y con una un calor entregado de $Q = 360204,68 \text{ KJ/h}$

$$I = \frac{360204,68 \text{ KJ} / \text{h}}{0,1603 \text{ mtr}^3}$$

$$I = 2,24 \text{ E6 } \text{KJ} * \text{mtr}^3 / \text{h}$$

Con esta podemos decir que para diferentes tipo de hornos esta en un rango de 0,1 a 3 E6 KJ*mtr³/h, nuestro horno esta dentro de este rango, lo que deducimos que la cámara esta bien implementada y cumple parta los parámetros de trabajo.

Con el volumen de nuestra cámara es de 0,1603 mtr³ con una dimensiones de h = 0,27 mtr, y un diámetro de 0,54 mtr. Lo indicamos en el plano #2.

2.2 Calculo de las paredes, piso y tapa del horno

El cálculo del diseño de la pared, ésta lijado con las perdidas de calor que se producen a través de esta. Esto se lo efectúa en base a las formulas de transferencia de calor a través de una pared dos sistemas a diferentes temperaturas, pero no tomamos en cuenta las perdida de calor por secciones donde no esta bien aislada.

Aproximadamente se tendrá los valores exactos tomando como superficie disipadora aquella que corresponde a la superficie media de cada una de las paredes.

Las aberturas se desprecian, calculamos como si estos huecos estuvieran llenos.

Al calcular las pérdidas de calor relativa a la disipación a través de la estructura debe calcularse solamente a partir del momento de que el horno entra en estado estable.

Para los cálculos de las paredes, piso y tapa del horno, se hizo el rediseño, tomando las medidas iniciales las cuales se reemplazó solo los ladrillos refractarios de alta alumina (Al_2O_3) seleccionados del catálogo A.P. Green (Refractory Pocket Catalog) y concreto refractario el cual será Croncrax 1500, concreto refractario aluminoso denso de 50% (Al_2O_3).

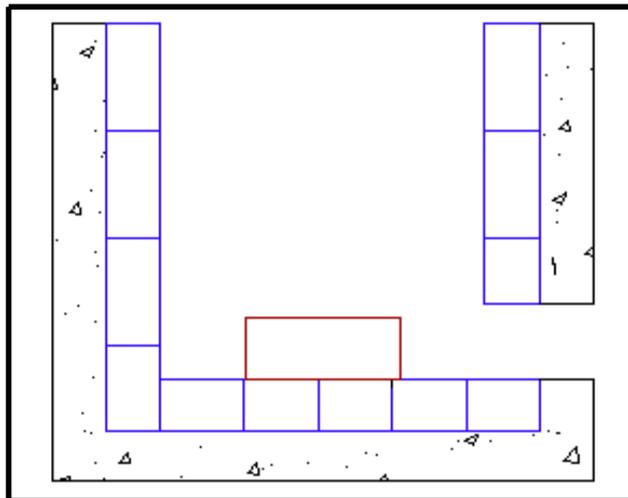
De la figura C (apéndice). Encontramos las conductividades, para los diferentes materiales refractarios a utilizar.

Se utilizó ladrillos refractarios de 90% de alumina, son desarrollados especialmente para condiciones de servicio a extremas temperaturas, con una buena estabilidad volumétrica, resistencia mecánica y capacidad de soportar choque térmico y absorción, con una temperatura máxima de servicio recomendada de $1800\text{ }^\circ\text{C}$.

El concreto aislante, tiene un contenido de 50% de alumina, con una baja conductividad térmica, adecuada para recubrimiento monolíticos no expuestos a fuego directo. Temperatura máxima de servicio recomendada de 1100 °C.

Figura 2.2.1

Ubicación de los materiales refractarios



En la figura 2.2.1 observamos la ubicación de los materiales refractarios, 1) ladrillos refractarios 90% de (Al_2O_3) , 2) concreto refractario 50% de (Al_2O_3) , 3) Peana de grafito donde se asienta el crisol, y convierte turbulento a la llama, 4) entrada de llama.

Cálculos:

Para los cálculos, las medidas son tomadas del horno inicial presentadas en el plano #2,. Además despreciamos la pared de acero ya que su espesor no influye mucho.

- Temperatura interior, $t_o = 1823 \text{ }^\circ\text{K}$

- Temperatura exterior, $t_s = 333 \text{ }^\circ\text{K}$

- Ladrillo refractario 90%(Al_2O_2) : $\mathbf{K}_1 = 9,79 \frac{\text{w}}{\text{mk}}$

- Concreto refractario 50% (Al_2O_2) : $\mathbf{K}_2 = 5,325 \frac{\text{w}}{\text{mk}}$

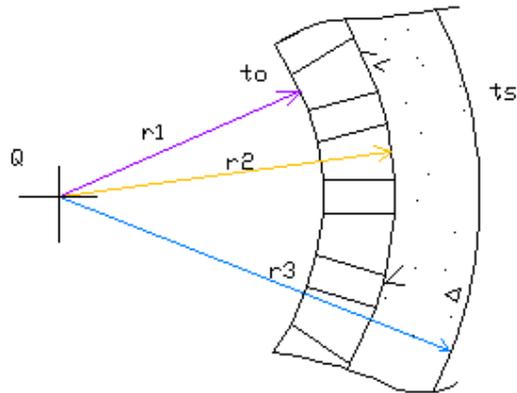
- Fibra cerámica $\mathbf{K}_3 = 0,048 \frac{\text{w}}{\text{mk}}$

- Con un calor generado de $Q = 360204,636 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = 100056,8731 \text{ w}$

Figura 2.2.1

Espesor de los refractarios de las paredes del horno





$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi kl} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi kl} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi kl}} \quad (2.2)$$

$$100056,8731 \text{ W} = \frac{(1823 - 333) \text{ K}}{\frac{\text{Ln}(0,466/0,35)}{2\pi(9,79)(0,90)} + \frac{\text{Ln}(r_3/0,466)}{2\pi(5,3250)(0,90)} + \frac{\text{Ln}((0,4797 + r_3)/r_3)}{2\pi(0,048)(0,28)}}$$

$$67,15 = \frac{1}{5,17E-3 + \frac{\text{Ln}(r_3/0,466)}{30,112} + \frac{\text{Ln}((0,4797 + r_3)/r_3)}{0,0844}}$$

$$r_2 = 0,419 \text{ mtr.}$$

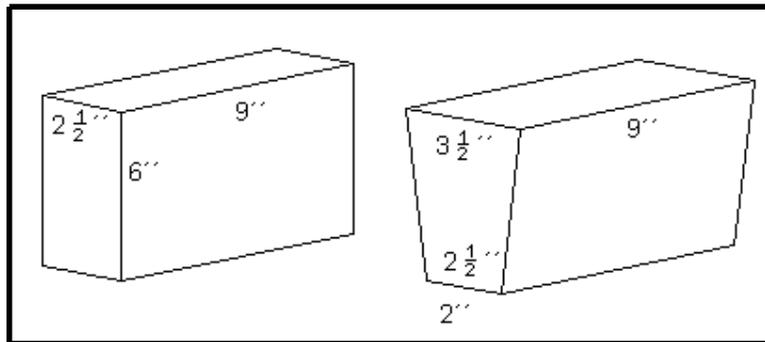
Restamos los radios y encontramos el espesor del refractario:

$$e = r_2 - r_1 = 0,149 \text{ mtr.} \approx 6 \text{ pulg.}$$

Con lo que seleccionamos nuestro refractario que tiene las dimensiones según la figura 2.2.2

Figura 2.2.2

Dimensiones del refractario



Con esta medida obtenida se obtiene cantidad de concreto requerido según el volumen del vacío entre los ladrillos y la pared.

$$V_c = V_t - V_r$$

V_c = volumen del concreto

V_t = volumen total del horno

V_r = volumen del refractario

$$V_c = 0,8082 - 0,473 = 0,3352 \text{ mtr}^3.$$

Cada saco de concreto puede llenar un volumen de $0,04 \text{ mtr}^3$.
aproximadamente, entonces:

$$\# \text{ sacos} = V_c / V_p$$

$$\# \text{ sacos} = 0,3352/0,04 = 8,38 \text{ sacos} \approx 8,5 \text{ sacos}$$

Para la construcción de la tapa solo se utilizamos los ladrillos refractarios seleccionados ya que no puede llevar concreto por el peso que al momento de vaciar la carga se complica debido a la fuerza que ejerce.

Foto 1: Colocación de los ladrillos refractarios



2.3 Mejoramiento del quemador para uso duplex de combustible

QUEMADOR (atomizador por aire)

Este tipo de quemador de aceite es muy fácil de instalar, relativamente barato y simple especialmente donde no es necesario realizar el control de aire y el suministro de combustible (aceite).

Los quemadores atomizados por aire, como una clase posee la capacidad de quemar cualquier tipo de aceite de diferentes viscosidades y de cualquier temperatura, el aire es utilizado para la atomización por su costo de operación es muy bajo en comparación con los de vapor.

Estos quemadores pueden ser divididos en 2 tipos:

1. De mezcla interna o premezclado de aceite y aire o mezclados de aire dentro del cuerpo(cámara del quemador), antes que sea dispersado dentro del horno.
2. Mezcla externa salida del aceite o combustible por una corriente de aire o vapor.

Para el mejoramiento del quemador observamos en la grafica plano #2 las adaptaciones que se le hizo al quemador, se implemento una entrada para el GLP, y otra para el oxigeno respectivamente a cada lado del quemador a la salida de atomizada del aceite y aire, por efecto

de arrastre, así se mezclan también estos dos elementos antes de que salgan del quemador.

Las presiones del gas a la entrada del quemador es de $8,1 \text{ lb/in}^2$, y del oxígeno es de 7 lb/in^2 .

Foto 2: Mejoramiento del quemador



Podemos notar las mejoras que se realizaron en el quemador, se implementó una tubería de acero galvanizado y se colocó materiales sellantes en las roscas y se pintó de amarilla para identificar el fluido

(GLP) que pasa hacia la entrada en el quemador. En la otra entrada el fluido es aire enriquecido con un 30% de O_2 .

Además podemos observar en la foto 3, al iniciar la combustión con GLP, lo cual nos permite calentar al horno aproximadamente a una temperatura de $400^{\circ}C$, para que cuando entre el desecho aceite lubricante encuentre una cámara precalentada lo que provoca una mejor ignición del combustible y reducción de los contaminantes.

Foto 3: Inicio de la combustión con GLP



Foto 4 : Combustión completa de los combustibles



2.4 Calculo, construcción y evaluación de impulsor del ventilador de alta presión

Consideraciones teóricas

Los impulsores suelen ser de dos tipos. Para una configuración las aspas dispuestas sobre un cubo o placa de respaldo y están abiertas del otro lado (caja).

Se observa un impulsor denominado cerrado, las aspas están cubiertas en los extremos del cubo y de la gualdera como se muestran en la figura 2.4.1

Los impulsores también pueden ser de aspiración simple o doble. Para el impulsor de aspiración simple, el fluido entra a través del ojo solo de un lado del impulsor, en cambio para los de aspiración doble el fluido entra al impulsor a lo largo de su eje desde ambos lados.

Aunque el flujo que pasa es muy complejo (inestable y tridimensional), la teoría básica de la operación se puede elaborar considerando flujo unidimensional medio del fluido a medida que pasa entre las secciones de entrada y salida del impulsor cuando gira el aspa.

Como se muestra en la figura 2.2 , para un trayecto normal de una aspa, la velocidad absoluta, V_1 , del fluido que entra al trayecto es el vector suma de la velocidad del aspa, U_1 , que gira en una trayectoria circular con velocidad angular, y la velocidad relativa, W_1 , dentro de la trayectoria del aspa, de modo que $V = W_1 + U_1$.

De manera semejante, a la salida se tiene que $V_2 = W_2 + U_2$. Obsérvese que $U_1 = r_1w$ y $U_2 = r_2w$. Las velocidades del fluido se

toman como las velocidades medias sobre las secciones de entrada y salida del trayecto del aspa.

La ecuación de la cantidad de movimiento indica el torque del eje, T_{eje} , necesaria para hacer girar el impulsor , está definida por la ecuación.

$$T_{eje} = \rho Q(r_2 V_{\theta 2} + r_1 V_{\theta 1}) \quad (2.4.1)$$

Donde $V_{\theta 1}$ y $V_{\theta 2}$ son las componentes tangenciales de las velocidades absolutas, V_1 y V_2 .

Para el eje giratorio, la potencia

$$W_{eje} = T_{eje} \omega$$

$$W_{eje} = \rho Q \omega (r_2 V_{\theta 2} + r_1 V_{\theta 1})$$

$$W_{eje} = \rho Q \omega (U_2 V_{\theta 2} + U_1 V_{\theta 1})$$

Figura 2.4.1

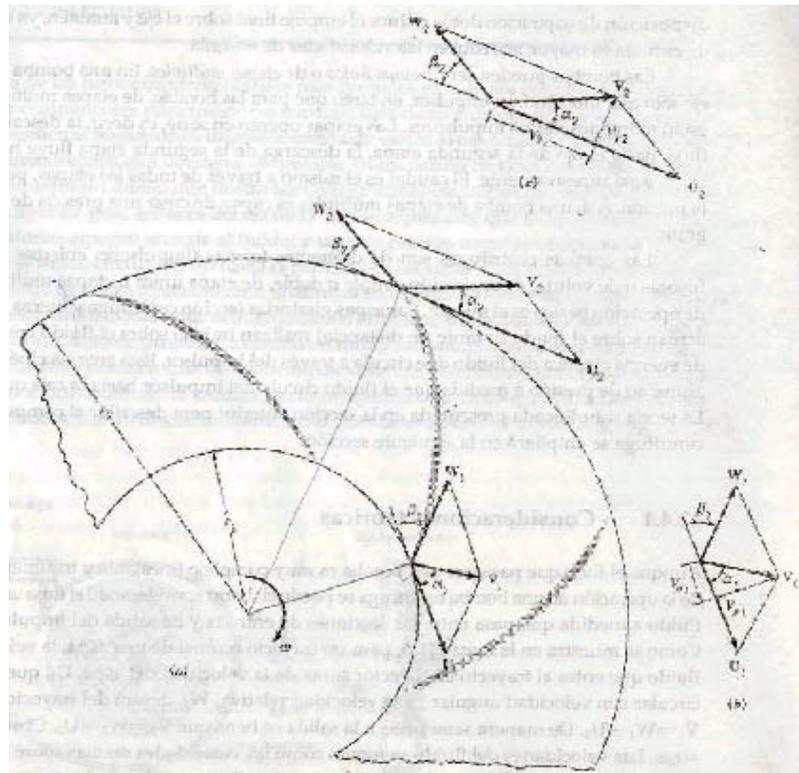


Diagrama de velocidades en un impulsor

Calculo:

Para la construcción del impulsor, se lo diseño en base a una carcasa de un ventilador ya existente en la empresa, lo cual se obtuvo medidas iniciales para los cálculos.

Foto 5: Carcasa del impulsor



diámetro exterior = 0,52 mtr

diámetro para el eje = 0,09 mtr.

ancho = 0,034 mtr

Para el cálculo encontramos el caudal requerido según el flujo de masa que se necesita.

$$Q = \frac{m^*}{\rho} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{135.56 \text{ kg/h}}{1,23 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q = 1098,91 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con el caudal encontramos la velocidad a la que entrar el aire al quemador

$$Q = V.A$$

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

$$V = \frac{1098,91m^3/h}{\frac{\pi(0,04)^2}{4}}$$

$V = 2,42$ m/s, velocidad de salida del impulsor.

Asumimos que es la velocidad con la que llega al quemador es la misma que sale del impulsor debido a que esta cerca y sus pérdidas son mínimas por su distancia corta.

Para impulsores reales, el ángulo del aspa β_2 varía de 15° a 35° , con un intervalo normal de $20^\circ < \beta_2 < 25^\circ$, y con $15^\circ < \beta_1 < 50^\circ$. Las aspas con $\beta_2 < 90^\circ$ se denominan aletas inclinadas hacia atrás, por lo general solo se diseñan aletas con aletas hacia atrás.

$$1 \text{ Hp} = 745,69 \text{ W}, 1 \text{ W} = \text{J/seg}$$

$$\omega = (1800 \text{ rev/min})(2\pi \text{ rad/1 rev})(1 \text{ min/60 seg})$$

$$\omega = 188,49 \text{ red/seg}$$

$$U_2 = r_2 w \quad (2.4)$$

$$U_2 = (0,50 \text{ mtr})(188,49\text{rad/seg})$$

$$U_2 = 94,247 \text{ mtr/s}$$

Para encontrar U_1 , asumimos diferentes radios, así damos un valor de

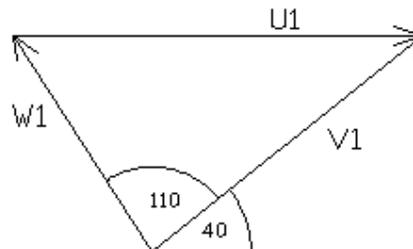
$$r_1 = 0,15 \text{ mtr.}$$

$$U_1 = (0,15\text{mtr})(188,49\text{rad/seg})$$

$$U_1 = 28,273 \text{ mtr/seg}$$

Con esto en las graficas de velocidades encontramos V_1

Figura 2.4.2



Según el diagrama:

$$V_1 = \frac{\text{Sen}40}{\text{Sen}110} U_1 \quad (2.4)$$

$$V_1 = (0,684)(28,273 \text{ mtr/seg})$$

$$V_1 = 19,33 \text{ mtr/seg}$$

$$\cos 40 = \frac{V_{\theta 1}}{V_1}$$

$$V_{\theta 1} = 13,32 \text{ mtr/seg}$$

Con los datos obtenidos encontramos $V_{\theta 2}$:

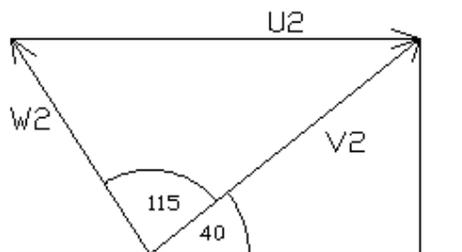
$$W_{eje} = \rho Q(U_2 V_{\theta 2} - U_1 V_{\theta 1}) \quad (2.5)$$

$$745,69 \frac{J}{seg} = (1,23 \frac{Kg}{m^3})(0,305 \frac{m^3}{seg}) \left[(94,247 \frac{m}{seg}) V_{\theta 2} - (28,273 \frac{m}{seg})(13,32 \frac{m}{seg}) \right]$$

$$V_{\theta 2} = 1,994 \text{ mtr/seg}$$

Según la grafica de velocidades:

Figura 2.4.3



Según el diagrama

$$V_2 = \frac{V_{\theta 2}}{\cos 40}$$

$$V_2 = \frac{1,994}{0,766}$$

$$V_2 = 2,61$$

Este valor de la velocidad es aproximado a la velocidad encontrada con el caudal necesario , $2,61 \cong 2,49$ lo que podemos asumir que nuestras asunciones están bien y que con los diámetros seleccionados podemos construir nuestro impulsor según a la figura A(anexo)

Una vez encontrado las medidas requeridas para la construcción del impulsor se proceso a la construcción del mismo, primero se soldó las aletas a una base de diámetros ya establecidos, lo cual podemos observar en la foto 6.

Foto 6: Construcción del impulsor



En la foto 7 podemos observar el ensamble de la parte superior del impulsor

Foto 7: Ensamble del impulsor



2.5 Instalaciones auxiliares de combustibles

Para las instalaciones de combustible, debemos tomar en cuenta la seguridad ya que uno de ellos es muy inflamable y de excesivo peligro en casos de un incendio, por lo que se instalaron los tanques de GLP y O_2 en la parte exterior de la fabrica, teniendo en cuenta su debida protección contra el medio, además el sistemas de tubería son de un espesor elevado para su debida protección en el traslado.

Foto 8: Instalaciones de combustibles



Como es un gas, las fugas de este pueden producirse debido a que tiene una presión de $7lb/in^2$, en los codos y demás uniones, por eso aparte del elemento sellante en las roscas (teflón), se puso un silicón

alrededor de las uniones, para asegurarse de cualquier fuga que existiera en los dos gases que van a servir para la combustión.

Además para cada tubería y los múltiples donde se van a colocar los tanques de GLP y oxígeno, seleccionamos un color para cada uno así no existirá confusión al momento de volver conectar los tanques al sistema de combustibles.

Las presiones necesarias para que realicen una buena combustión es de 7 lb/in^2 del GLP, y de 8 lb/in^2 , en la entrada del quemador, para lo cual calculamos las pérdidas para saber a qué presión deben salir de los múltiples.

Cálculos:

Para esto tenemos los datos iniciales:

A la llegada del gas debemos tener una presión de; $P_2 = 7 \text{ lb/in}^2 = 48265 \text{ N/m}^2$

Las velocidades respectivas son de la entrada y salida, de $V_1 = 11,82 \text{ m/s}$; $V_2 = 106 \text{ m/s}$, $h_1 = 0$ por desde aquí partimos nuestro punto de referencia, $h_2 = 2,3 \text{ mtr.}$

Encontramos las perdidas en los complementos, en los anexos tabla F como los codos que hemos utilizado son de acero galvanizado encontramos $K_L = 0,7$.

$$h_L = K_L (V^2 / 2g) \quad (2.5.1)$$

$$h_L = \frac{0,7}{2 * 9,81} (5 * (106,41)^2)$$

$$h_L = 2019,91 \text{ mtr.}$$

Las perdidas por fricción en las tuberías, en los anexos en la tabla A , sabemos que las tuberías son de hierro galvanizado, encontramos $\varepsilon = 0,15 \text{ mm}$, de modo que $\varepsilon/D = 0,000123$, además encontramos Reynolds.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.5.2)$$

$$Re = \frac{6.67e - 1 \text{Kg} / \text{m}^3 * 106,41 \text{m} / \text{s} * 0,01905 \text{m}}{1,10e - 5 \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2}$$

$$Re = 1,21939E 5$$

Entonces los datos obtenidos, en los anexos figura B, en el diagrama de Moody encontramos $f = 0,010$, y encontramos las perdidas.

$$h_L = f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.5.3)$$

$$h_L = \frac{0,010}{0,01905 * 2 * 9,81} (106,41)^2 [1,5 + 0,2 + 0,9 + 6,18 + 0,1]$$

$$+ \left[\frac{0,010 * 0,2 * 11,81^2}{6,35E - 3 * 2 * 9,81} \right]$$

$$h_L = 4701,752 \text{ mt}$$

Con las perdidas, procedemos a encontrar la presión con la cual debe salir el gas desde el múltiple.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gh_2 + \sum P_c + \sum P_f \quad (2.5.4)$$

$$\frac{P_1}{6,67E-1 \frac{Kg}{m^3}} + \frac{(11,82 \frac{m}{s})^2}{2} + 22,563 \frac{m^2}{s^2} = \frac{48265 \frac{N}{m^2}}{6,67E-1 \frac{Kg}{m^3}} + \frac{(106,41 \frac{m}{s})^2}{2} + 0 + 201991 + 4701,75$$

$$P_1 = 56464,38061 \frac{N}{m^3} * 1,45E-4$$

$$P_1 = 8,1 \frac{lb}{in^2}$$

Con esto tenemos que ingresar con una presión de 8.1 lb/in², para que el gas llegue al horno con una presión de 7 lb/in² y así cumpla una buena combustión.

Para lo cual se instalaron a la salida de cada múltiple reguladores de presión, lo cual nos garantiza que vamos a obtener las presiones necesarias para obtener una buena combustión, esto se puede observar en la foto 9.

Foto 9: Válvula reguladora de O₂



Foto 10: válvula reguladora de GLP



CAPITULO 3

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

3.1 Evaluación del equipo con relación a las emisiones gaseosas

Algunas partes del horno fueron remplazadas en el caso de los ladrillos refractarios y mejoras como fue el quemador. Una evaluación se puede indicar según las emisiones que producía el horno antes de la implementación y después de la misma, para lo cual vamos hacer una comparación entre las emisiones.

Además podemos decir que hubo un cambio total en la parte de contaminantes generados al medio, a simple vista cuando solo se utilizaba aceite + aire, al instante que comenzaba la operación del horno se generaba una nube espesa, la cual disminuía acorde se regulaba la entrada de aceite y comenzara a elevarse la temperatura interna del la cámara de combustión pero no desaparecía en su totalidad, esto podía

ser aproximadamente en un tiempo de 15 min, para que deje de emitir el humo negro, pero se puede observar que a lo largo del proceso de fundición no deja de producir humo un poco menos denso que el inicial, pero esto generado en un transcurso de las tres partes del tiempo de operación, ya que después de transcurrido este tiempo la temperatura de la cámara se eleva lo que provoca que el aceite pueda ser quemado mas fácilmente.

Para el nuevo proceso de fundición los pasos a seguir son: se comienza la operación con la quema de GLP, en un tiempo de 15 min, lo que se lleva al horno de una temperatura de 0 °C a 400 °C aproximadamente, esto provoca que cuando se ingresa el aceite pulverizado al horno, este se encuentre en un medio con una temperatura elevada, lo que provoca la implosión instantánea de las partículas mas finas, y de la evaporación de las partículas mas gruesas, seguido de su implosión, así se mejora la combustión quemando todo el combustible(aceite), generando menos contaminantes al medio.

Visualmente podemos evaluar que los humos no se pueden notar con facilidad, sea al inicio del proceso o cuando se ingresa aceite, ya que al ingresar el oxígeno adicionalmente la temperatura del horno aumenta, con lo que mejora el proceso.

Podemos evaluar las emisiones de la implantación, según las emisiones que se generan, según la tabla 3.1.

Tabla 3.1
Evaluación de las emisiones

Emisiones	Horno sin implantación	Horno con implantación	Limite permitido
NO _x (ppm) (mg/m ³)	161,0 (331)	84,3 (173,0)	(700,0)
SO ₂ (ppm) (mg/m ³)	227,7 (650)	137,3 (392,0)	(1650,0)
CO (ppm) (mg/m ³)	233,9 (292)	200,8 (251,0)	No aplicable

Podemos observar que los contaminantes que se producen se reducen en un relación aproximada de 2 a 1, y comparando con los limites que permiten las regulaciones podemos decir que son muy bajas, lo cual estamos muy por debajo de una generación excesiva de contaminación y podemos decir que el proceso en la mejora del horno, es muy rentable en el aspecto ecológico.

Foto 11: Combustión con GLP



En la foto podemos observar que la llama es muy baja y no se observa una emisión de gases mínimos.

Foto 12: Combustión completa de la combinación de Aceite+GLP+O₂



Se observa el aumento de la intensidad de llama y con esto la temperatura interna del horno. Además se observa que no existe ningún tipo de emisiones de humo negro.

3.2 Evaluación del equipo con relación a la operación de fusión

Una evaluación de los equipos que se utilizan para dicho proceso de fundición, es el tiempo de trabajo y la temperatura a la cual podemos llegar, para lo cual podemos observar en la tabla 3.2.

Tabla 3.2

Evaluación del equipo con relación a la operación de fusión

	Horno sin implantación	Horno con implantación
Temperatura de llama (°C)	1212	1450
Temperatura del horno (°C)	962	1200
Tiempo de fundición (200 Kg- carga) horas	4,10	3,20

Podemos observar que las temperaturas aumentan notablemente, lo que aumenta la eficiencia del horno por que a mayor temperatura que se obtenga el tiempo de fundición se reduce.

Este tiempo se redujo en un 22%, lo que para la fabrica es una mejora en el tiempo de trabajo así se produce mas en menos tiempo y se puede aumentar la producción.

Además como se obtiene temperaturas elevadas mejora los proceso de fundición, ya necesitan temperaturas elevadas para que el material se obtenga optimo al momento de colar el metal en los moldes, ya que deben estar unos grados por encima a la de fusión del material, obteniendo un mejor acabado superficial de las piezas a fabricar ya que permite a una mejor solidificación.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de terminar el rediseño, la evaluación de las emisiones y de los equipos, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

1.- Con los resultados obtenidos, la empresa entra a un cambio ambiental, y esta dentro de los márgenes de las regulaciones ambientales municipales, con lo cual, podría acceder a la compra, transportación y quema de estos desechos.

2.- Se ha tratado de eliminar las pérdidas de calor a través de las paredes, piso y tapas, por lo cual seleccionamos un ladrillo refractario de alta alumina (Al_2O_3), y un concreto del 70% de alumina (Al_2O_3), así retenemos calor en la

cámara de combustión, y se reduce el tiempo de estabilidad de la temperatura del horno.

3.- Además, algunos datos para ciertos cálculos de este rediseño se los obtuvo experimentalmente, esto nos ayudó para tener resultados más favorables.

4. Podemos observar que se reduce las emisiones generadas al medio notablemente en el transcurso del proceso, con lo que se reduce la contaminación.

Podemos sugerir las siguientes recomendaciones:

1.- Podemos recomendar que para un próximo proyecto se pueda implementar un proceso de recuperación de calor ya que esto aumentaría la temperatura del horno, su eficiencia y haciéndolo más económico en tiempo y dinero, en una fundición.

APENDICE

Figura A: Diagrama de Moody

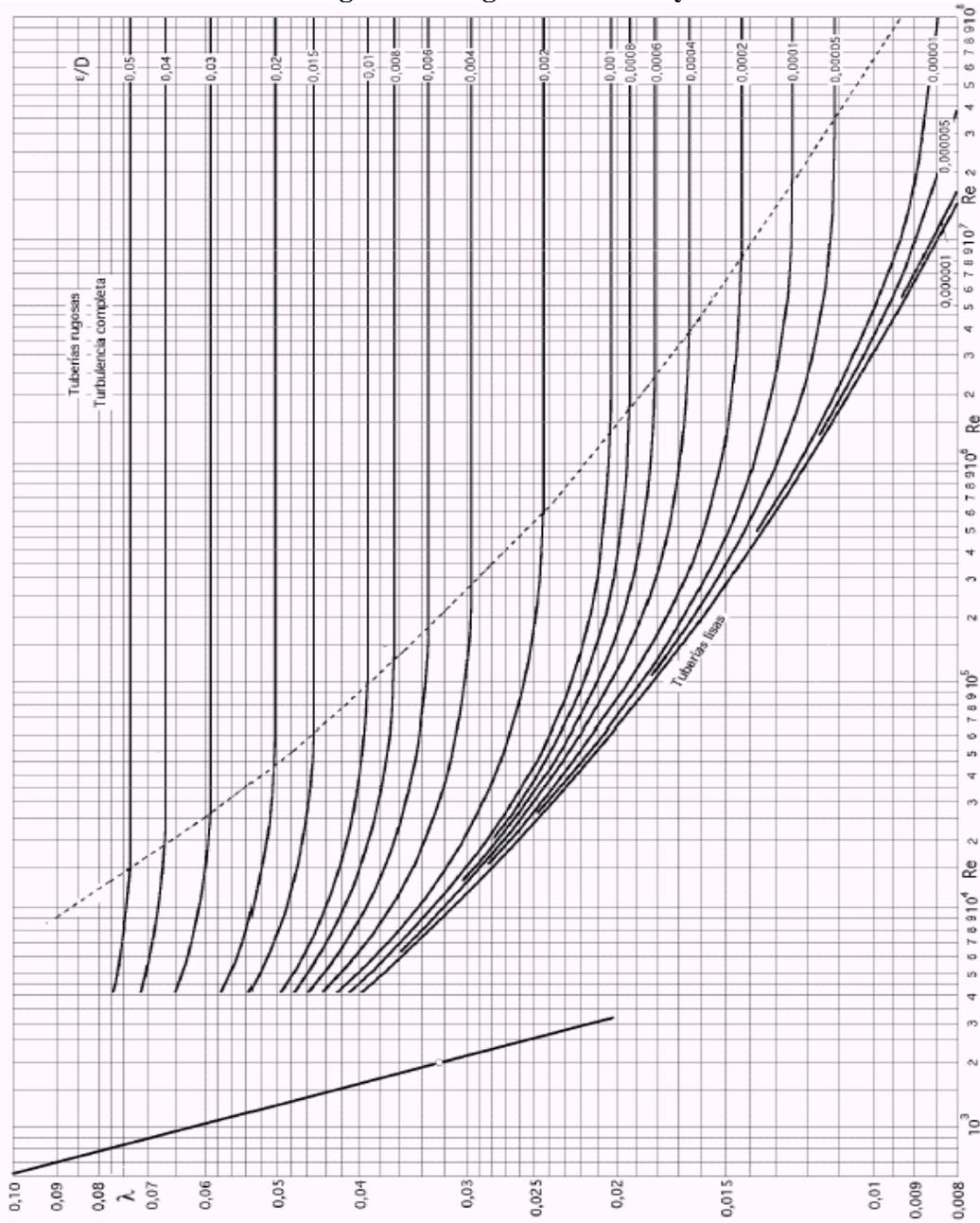


Figura B
 Tabla de la constante K1 para diferentes tipos de acoples

Coefficientes de pérdida para componentes de tuberías $(K_1 = K_2 = K_3)$ Datos tomados de las referencias 8, 10, 27)

Componente	K_1	
a. Tuberías acodadas		
Regular de 90°, embridado	0.3	
Regular de 90°, roscado	1.5	
De 90° con gran radio, embridado	0.2	
De 90° con gran radio, roscado	0.7	
De 45° con gran radio, embridado	0.3	
Regular de 45°, roscado	0.4	
b. Codos de 180°		
Codo de 180°, embridado	0.3	
Codo de 180°, roscado	1.5	
c. Conexiones en T		
Flujo de línea, embridado	0.3	
Flujo de línea, roscado	0.9	
Flujo derivado, embridado	1.0	
Flujo derivado, roscado	2.0	
d. Unión, roscado		
	0.05	
e. Válvulas		
Esférica, totalmente abierta	10	
Angular, totalmente abierta	2	
De compuerta, totalmente abierta	0.15	
De compuerta, 1/4 cerrada	0.25	
De compuerta, 1/2 cerrada	2.1	
De compuerta, 3/4 cerrada	17	
De retención a la braga, flujo hacia adelante	2	
De retención a la braga, flujo hacia atrás	∞	
De bola, totalmente abierta	0.05	
De bola, 1/3 cerrada	5.3	
De bola, 2/3 cerrada	20	

BIBLIOGRAFÍA

1. Bruce R. Munson, Fundamentos de Mecánica de Fluidos.(1ra.Edición, New York , 1999), Capitulo 12.
2. Power-Generation systems, the McGraw Hill Magazine of Energy Systems Engineering.
3. Bertha Jiménez León, tesis de grado “Mejoramiento de operación de horno de fusión por medio del uso de quemadores de combustibles mixtos”, ESPOL 2004.
4. Virgil Moring Faires, Termodinámica (6ta.Edición, Mac Millan, U.S.A. Texas.1978), Capitulo 13.
5. Bombas, selección, uso y mantenimiento, Richard W. Greene,McGraw Hill. 1992
6. Victor Menoscal, tesis de grado “ Obtención de alta temperatura en un horno basculante para fundir acero por recuperación de calor” ESPOL 1989.
7. Robert H. Perry, Manual del Ingeniero Químico (6ta.Edición, McGraw Hill, U.S.A. Kansas, 2000) Capitulo 5.
8. A.P. Green, Refractory Pocket Catalog, (Mexico, 1995), pp. 96-112

ANEXOS

Tabla A

TIPOS DE CONTAMINANTES Y SU PROCEDENCIA

Fórmula Química	Nombre	Procedencia principal	Otras procedencias
CO ₂	Dióxido de carbono	Combustión de sustancias que contienen C	Componente no combustible del combustible
H ₂ O	Vapor de agua	Combustión de sustancias que contienen H ₂	Combustible húmedo
N ₂	Nitrógeno	Aire	Componente no combustible del combustible
CO	Monóxido de carbono	Combustión realizada con aire en defecto	Un gas combustible puede tener CO en su composición
H ₂	Hidrógeno	Combustión realizada con aire en defecto	
SO ₂	Dióxido de Azufre	Presencia de S en el combustible	puede tener SO ₂ en su composición

Se indican las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos producto de los combustibles.

TABLA B**CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES COMUNES QUE DEFINEN LOS NIVELES DE ALERTA, DE ALARMA Y DE EMERGENCIA EN LA CALIDAD DEL AIRE**

CONTAMINANTE PERÍODO DE TIEMPO	Y	ALERTA	ALARMA	EMERGENCIA
Monóxido de Carbono				
Concentración promedio en ocho horas		15 000	30 000	40 000
Oxidantes Fotoquímicos, expresados como ozono.				
Concentración promedio en una hora		300	600	800
Óxidos de Nitrógeno, como NO ₂				
Concentración promedio en una hora		1 200	2 300	3 000
Dióxido de Azufre				
Concentración promedio en veinticuatro horas		800	1 600	2 100
Material Particulado PM ₁₀				
Concentración en veinticuatro horas		250	400	500

Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25 °C y 760 mm Hg.

TABLA C

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTIÓN. NORMA PARA FUENTES EN OPERACIÓN A PARTIR DE ENERO DE 2003

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	150	mg/Nm ³
	Líquido [2]	150	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/Nm ³
	Líquido [2]	550	mg/Nm ³
	Gaseoso	400	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm ³
	Líquido [2]	1 650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

TABLA D

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTIÓN. NORMA PARA FUENTES EN OPERACIÓN ANTES DE ENERO DE 2003

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	VALOR	UNIDADES [1]
Partículas Totales	Sólido	355	mg/Nm ³
	Líquido [2]	355	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	1 100	mg/Nm ³
	Líquido [2]	700	mg/Nm ³
	Gaseoso	500	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm ³
	Líquido [2]	1 650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable