

T  
621.4025  
TINM



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

**Mejoramiento de Operación de Horno de Fusión por medio del uso de  
Quemadores de Combustible Mixto Enriquecido con Oxígeno**

#### **TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERA MECÁNICA**

**Presentada por:**

Bertha Teresa Jiménez León

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año : 2004

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y a la Virgen, por permitirme continuar adelante.

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

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a quien le debo mi formación como Ingeniera.

*Efficáctas* por la confianza depositada en mí, y su apoyo técnico.

A todos los que de alguna manera contribuyeron para la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

A MIS  
PADRES: EDGAR Y BERTHA  
HERMANOS: EDGAR Y MARIUXI  
Y ABUELITOS:  
NICOLAS Y BERTHA,  
CARLOS Y TERESA



## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.  
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Alfredo Barriga R.  
VOCAL

Ing. Omar Serrano V.  
VOCAL



## DECLARACIÓN EXPRESA

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

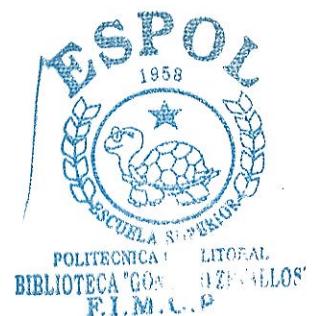
(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



## RESUMEN

La presente Tesis se relaciona con las empresas artesanales e industriales que utilizan como combustible al aceite lubricante usado, solo o con fuel oil, para realizar sus actividades. Mediante esta Tesis de Grado se describirá y evaluará la magnitud de la contaminación de una pequeña empresa de fusión de metales, en lo que respecta a emisiones al aire, tanto en la situación actual como en la situación esperada. Además hace una comparación entre las soluciones mediante tratamiento convencional (tales como filtros, lavadores, entre otros) y el método de prevención. Esta metodología se conoce como Producción más Limpia.

Una vez demostrado que la Producción más Limpia es siempre una inversión, se podrá definir la mejor elección para minimizar los problemas generados y a la vez aumentar la eficiencia al sistema de fusión existente. En esta Tesis se plantearán las alternativas posibles, de las cuales se escogerá la que se ajuste más a la realidad del país, tanto en la parte técnica, como social y económica.



Durante la realización de esta Tesis, se harán pruebas en el horno de fusión, antes y después de haber hecho los cambios. Se espera demostrar que mediante esta metodología se logrará disminuir las emisiones y mejorar el horno de fusión, sin tener que pensar en una solución convencional o tratamiento de fin de tubo.

## ÍNDICE GENERAL

	PAG.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE PLANOS.....</b>	<b>XI</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. SITUACIÓN ACTUAL .....</b>	<b>3</b>
1.1. Descripción del Proceso de Fusión .....	3
1.1.1. Primera Etapa: Fabricación de Modelos.....	4
1.1.2. Segunda Etapa: Moldeo .....	5
1.1.3. Tercera Etapa: Secado de Molde .....	6
1.1.4. Cuarta Etapa: Preparación de Carga de Fundición .....	6
1.1.5. Quinta Etapa: Fusión de Metal .....	7
1.1.6. Sexta Etapa: Colado del Metal .....	14
1.1.7. Séptima Etapa: Desmoldeo .....	15



1.2. Problema de la Quema de Aceite Lubricante Usado y Otros Combustibles Líquidos .....	15
1.2.1. Problemas de la Ignición de los Combustibles ....	17
Fósiles Líquidos .....	17
1.2.1.1. Contaminación Debida al Azufre .....	18
1.2.1.2. Contaminación Debida al Material Particulado.....	19
1.2.1.3. Contaminación Debida al Nitrógeno.....	20
1.2.1.4. Contaminación Debida al Carbono.....	21
1.2.1.5. Contaminación Debida a Otros Contaminantes .....	23
1.2.2. Efectos en la Salud Debido a los Contaminantes Emitidos por la Quema de Combustibles Fósiles Líquidos .....	24
1.2.3. Problemas de la Ignición del Aceite Lubricante Usado .....	26
1.2.4. Efectos en la Salud debido a los Contaminantes Emitidos por la Quema de Aceite Lubricante Usado.....	30
1.2.5. Combustible Fósiles Líquidos y Gaseosos Disponibles en el Ecuador .....	31
1.3. Evaluación de las Emisiones en Horno de Fusión.....	32

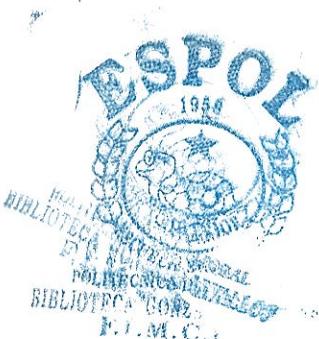
## **2. FORMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ATMÓSFERICOS DE LA COMBUSTIÓN.....**

2.1. Definición de Residuos.....	37
2.2. Historia de la Gestión de Residuos.....	38



2.3 Método Convencional de Eliminar Residuos .....	39
2.3.1. Tratamiento de Residuos Industriales Gaseosos .....	40
2.3.1.1. Separación de Material Particulado.....	41
2.3.1.2. Separación de gases /vapores.....	45
2.4. Método de Prevención para Minimizar Residuos .....	50
2.4.1. Reducción en el origen.....	54
2.4.2. Reutilización y reciclaje .....	55
2.5. Comparación de los Sistemas de Control de la Contaminación y Método de Prevención para Minimizar Residuos .....	56
 <b>3. PROPOSICIÓN DE LA SOLUCIÓN.....</b>	 60
3.1. Quemadores a Diesel.....	74
3.1.1. Características.....	74
3.1.2. Ventajas y Desventajas .....	78
3.2. Quemadores a GLP .....	79
3.2.1. Características.....	79
3.2.2. Ventajas y Desventajas .....	84
3.3. Quemadores Diales: Diesel y GLP .....	86
3.3.1. Características.....	86
3.3.2. Ventajas y Desventajas .....	87

<b>4. EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES .....</b>	<b>89</b>
4.1 Pruebas del Horno Convertido .....	89
4.1.1. Equipos Utilizados .....	91
4.1.2. Resultados de las Pruebas.....	92
4.2. Matriz de Decisión .....	103
4.2.1. Criterios y Ponderación: .....	104
4.2.2. Matriz de Decisión Técnica .....	106
4.2.3. Matriz de Decisión Económica .....	110
4.2.4. Matriz de Decisión de Seguridad.....	113
4.2.5. Matriz de Decisión Ambiental.....	114
4.2.6. Matriz de Decisión Preliminar .....	116
4.2.7. Matriz de Selección Final .....	117
4.3. Análisis de Viabilidad Técnica, Social y Económica .....	120
4.4. Elección de Quemador .....	120
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>121</b>
<b>APÉNDICES:.....</b>	<b>124</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>125</b>



## ABREVIATURAS

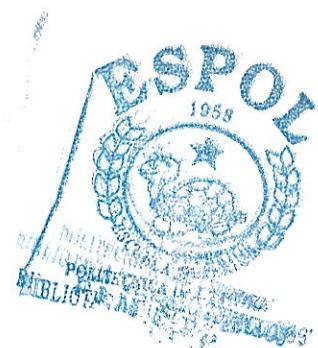
Btu	British Thermal Units (Unidades Británicas Termales)
O	Oxígeno
C	Carbono
cfm	Cubic Feet per minute
°C	Grados centígrados
gal	Galones
GLP	Gas Licuado de Petróleo
H	Hidrógeno
HP	Horse Power (Caballos de Potencia)
in	Pulgada
kcal	Kilo caloría
kJ	Kilo Joules
kg	Kilogramo
lb	Libras
m	Metros
mg/m <sup>3</sup>	Miligramos por metro cúbico de aire a condiciones normales (0 °C y 1 atm), y corregidos a 7% de Oxígeno
N	Nitrógeno
N/m <sup>2</sup>	Newton por metros cuadrados
O	Oxígeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCBs	Polychlorinated biphenyls (bifenilos policlorados)
PM	Material Particulado
ppm	Partes por millón
s	Segundo
S	Azufre
USD	Dólares Americanos
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

## SIMBOLOGÍA

C <sub>x</sub>	Calor específico del sólido x
%p	Porcentaje en peso

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Partes Constituyentes de un Horno de Crisol Fijo .....	10
Figura 1.2. Formas de Crisoles de Grafito .....	13
Figura 1.3. Formas de Extracción de un Crisol de un Horno Fijo .....	13
Figura 2.1. Esquema de Lavador de Gases.....	45
Figura 3.1. Triángulo de la Combustión .....	61
Figura 3.2. Efecto de Enriquecimiento con Oxígeno sobre la Temperatura de la Llama .....	69
Figura 3.3. Enriquecimiento con Oxígeno Premezclado.....	69
Figura 3.4. Inyección de Oxígeno Mediante Lanzas .....	70
Figura 3.5. Horno y Quemador .....	74
Figura 3.6. Diagrama Esquemático de Algunos Quemadores de Combustible Líquido .....	77
Figura 3.7. Quemadores Típicos de Gas .....	81
Figura 3.9. Esquema de Un Quemador Dual: GLP – Diesel.....	87



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Constantes Físicas de Algunos Metales y Aleaciones.....	8
Tabla 2 Hornos Industriales de Fusión.....	9
Tabla 3 Principales Problemas Ambientales .....	16
Tabla 4 Criterios de los Efectos en la Salud de los Principales Contaminantes del Aire de la Oms .....	24
Tabla 5 Contaminantes Adicionales del Aceite Lubricante Usado.....	30
Tabla 6 Combustibles Fósiles Líquidos y Gaseosos .....	31
Tabla 7 Comparación entre Concentraciones de Contaminantes Obtenidos de Factores de Emisión y la Regulación Ambiental Ecuatoriana y el Banco Mundial.....	34
Tabla 8 Tendencia Histórica de la Gestión Ambiental a Nivel Mundial .....	38
Tabla 9 Resultados de los Parámetros Medidos para Sistemas que Utilizan Aceite Lubricante Usado.....	93
Tabla 10 Resultados de los Parámetros Medidos para Sistemas que Utilizan Diesel .....	94
Tabla 11 Resultados de los Parámetros Medidos para Sistemas que Utilizan GLP .....	95
Tabla 12 Resultados de los Parámetros Medidos para Sistemas que Utilizan Diesel - Glp.....	96
Tabla 13 Consumo Específico del Combustible .....	100
Tabla 14 Criterios y Ponderación para Escoger el Mejor Quemador para la Operación del Horno de Fusión .....	104
Tabla 15 Comparación entre los Sistemas de Quemadores Utilizados en las Pruebas Basadas en Características Técnicas.....	106
Tabla 16 Calificación de los Parámetros Técnicos .....	107
Tabla 17 Comparación entre los Sistemas de Quemadores Utilizados en las Pruebas Basadas en Características Económicas .....	110
Tabla 18 Calificación de los Parámetros Económicos.....	111
Tabla 19 Comparación entre los Sistemas de Quemadores Utilizados en las Pruebas, Basadas en Características de Seguridad .....	113
Tabla 20 Calificación de los Parámetros de Seguridad .....	113
Tabla 21 Comparación entre los Sistemas de Quemadores utilizados en las Pruebas Basadas en Características Ambientales .....	115
Tabla 22 Calificación de los Parámetros Ambiental .....	115
Tabla 23 Resumen de los Valores Calculados para las Alternativas de Quemadores contra los Criterios de Decisión .....	116
Tabla 24 Evaluación de las Alternativas de Quemadores Contra Criterios y Ponderación .....	118

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1

## Implantación General

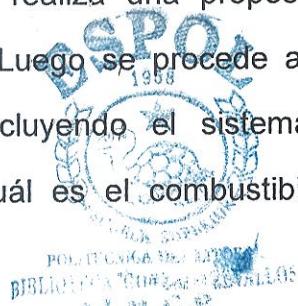


## INTRODUCCIÓN

Este proyecto consiste en la elección del mejor sistema de combustible para los hornos de fusión en reemplazo del aceite lubricante usado, en una empresa local de fundición. La elección del tema se debió a que en la actualidad muchas empresas utilizan el aceite lubricante usado como combustible, pensando que es una forma de minimizar los costos, mas no se perciben los costos asociados al uso de éste, como son los costos sociales, sustentables, legales y ambientales.

En la primera parte se presenta la situación actual de la empresa, en la que está incluida una estimación de las emisiones que se pueden obtener con diferentes combustibles. También se describe la forma de tratar las emisiones generadas por el uso del aceite lubricante usado, que puede ser de la forma tradicional, dispositivos de control, o por medio de la prevención – Producción más Limpia- , en este caso es el cambio de combustible. Una vez que se evalúa ambos métodos, se llega a la conclusión que la mejor opción es la prevención.

En la segunda parte de esta Tesis, se realiza una proposición de las diferentes soluciones que se puede dar. Luego se procede a realizar las pruebas de las diferente soluciones, incluyendo el sistema actual de combustible, para así poder comparar cuál es el combustible que tiene



menores impactos en el medio ambiente, el que brinda una mejor seguridad industrial en la empresa, el más económico y el que cumple con los requisitos técnicos que posee el aceite lubricante usado. Dentro de los sistemas en los que se van a realizar los ensayos están, el diesel, el GLP, el diesel + GLP, y en todos estos casos se incluye la adición de oxígeno, que teóricamente mejora los parámetros de combustión.

La última parte de este proyecto consiste en hacer una evaluación, utilizando los resultados obtenidos por las pruebas y por medio de una matriz de decisión, donde se contemplan criterios tales como impactos: social, ambiental, económico y técnico. Finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones encontradas en el presente trabajo.

# CAPÍTULO 1

## 1. SITUACIÓN ACTUAL

### 1.1. Descripción del Proceso de Fusión

El proceso de fusión o colado consiste en formar objetos vertiendo líquido en un molde. Un colado es un objeto formado al permitir que el material se solidifique. Una fundición es la colección de los materiales necesarios y el equipo para producir un colado. Prácticamente todo metal de manera inicial se cuela.

El colado en arena y sus ramificaciones son los que más se usan; más de 90% de todos aquellos son colados en arena. El colado en arena es muy adecuado para el hierro y el acero a sus altas temperaturas de fusión, pero también predomina para el aluminio, latón, bronce y magnesio.



El proceso de fundición consta de siete etapas, las cuales serán descritas a continuación.

### **1.1.1. Primera Etapa: Fabricación de Modelos**

El modelo es una forma usada para preparar y producir una cavidad en el molde. El diseño debe ser lo más simple que sea posible para facilitar el retiro del modelo de la arena y de esta manera evitar más corazones de los necesarios. Para la realización de modelos se utiliza generalmente madera, ya que es sencillo trabajarla y se puede encontrarse fácilmente en el mercado. Los materiales auxiliares generalmente usados son clavos, masilla plástica, lija, pulidora, pintura, sellador y diluyente.

Si el uso requiere un modelo de metal, entonces el modelo deberá probablemente montarse en una placa e incluir el sistema de colado, canal de distribución más entradas a las piezas. Los modelos de metal pueden estar sueltos o montados en placas.

### 1.1.2. Segunda Etapa: Moldeo

Durante esta etapa se procede a la preparación de los moldes.

Un molde es un recipiente que tiene la cavidad o cavidades, de la forma que va a colarse. Los moldes son los elementos que sirven para obtener la forma de las piezas que deseamos, éstos constan de dos partes: el modelo que forma la parte exterior y el macho o corazón que forma la superficie interior. Los materiales que se utilizan para hacerse los moldes pueden ser en (1) moldes de arena verde, (2) moldes de arena seca, (3) moldes de corazón de arena, (4) moldes de arcilla, (5) moldes de cáscara, (6) moldes ligados con cemento. Los principales métodos para hacer estos moldes se llaman (1) moldeo en banco. (2) moldeo en máquina, (3) moldeo en el piso y (4) moldeo en fosa.

Para la realización de los moldes se selecciona una caja de moldeo más grande que la cavidad del molde que va a contener, para permitir los rebosaderos y el sistema de compuertas. Debe tener también suficiente masa del molde arriba y debajo de la cavidad para evitar que el metal se abra paso a través de la arena durante el colado.



Para tamizar la arena en las empresas artesanales generalmente se utiliza un cernidor, que es una red de metal con orificios de un determinado número de micras. En empresas más industrializadas a veces se cuenta con equipos tales como molino de rodillos, los cuales sirven para dar la mayor uniformidad a la arena.

#### **1.1.3. Tercera Etapa: Secado de Molde**

Una vez que se ha construido el molde, se procede a secarlo por medio de un quemador a gas, para que no queden micro burbujas de agua en el molde. La eliminación de éstas son importantes, debido a que son una de las causas de que existan fallos en el proceso del colado, ya que pueden provocar porosidades en el metal colado.

#### **1.1.4. Cuarta Etapa: Preparación de Carga de Fundición**

Durante la cuarta etapa, previo a la fundición de los metales se preparan los materiales que ingresarán en el horno. En esta etapa se prepara la chatarra, o lingotes de metal que van a ingresar al horno, debido a que muchas veces el material puede



venir con impurezas, o hay que dividirlo para que sea más fácil fusionarla en el horno.

#### **1.1.5. Quinta Etapa: Fusión de Metal**

Esta operación es la más importante del proceso, y en la cual se enfocará la Tesis. La mayor cantidad de problemas de las fábricas de fusión de metales se presentan durante esta etapa.

La fusión consiste en hacer pasar los metales y sus aleaciones del estado sólido al estado líquido, generando determinada cantidad de calor, la cual está bien definida para cada metal o aleación.

Como se comprende fácilmente, después que se ha alcanzado la temperatura o punto de fusión es necesario generar más calor para poder transformar el metal o la aleación de sólido en líquido. Durante este periodo, la temperatura no aumenta, y la cantidad de calor generada, destinada solamente a disgregar el estado sólido, se llama calor latente de fusión. Cuando toda la masa es líquida, si se continúa generando calor, la temperatura vuelve a aumentar y el metal se recalienta. El calor específico

varía sensiblemente con la temperatura y con el tipo de metal o aleación

La tabla 1 indica las temperaturas de fusión, calores específicos medios y calores latentes de fusión de algunos de los metales y aleaciones más corrientemente empleados en fundición.

**TABLA 1**  
**CONSTANTES FÍSICAS DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES [2]**

Metal o Aleación	Temperatura de Fusión °C	Calor Específico del Sólido C <sub>1</sub> kcal/kg.°C	Calor Específico del Líquido C <sub>2</sub> kcal/kg.°C	Calor Latente de Fusión C <sub>3</sub> kcal/kg
Estaño	232	0.056	0.061	14
Plomo	327	0.031	0.04	6
Zinc	420	0.094	0.121	28
Magnesio	650	0.25		72
Aluminio	657	0.23	0.39	85
Latón	900	0.092		
Bronce	900 a 960	0.09		
Cobre	1083	0.094	0.156	43
Fundición gris	1200	0.16	0.2	70
Fundición blanca	1100	0.16		
Acero	1400	0.12		50
Níquel	1455	0.11		58

Como se vio en la tabla 1, dependiendo del material que se va a fundir, la temperatura varía. Y así mismo los hornos de fusión



dependen de la temperatura de fusión del material. En la tabla 2, se presenta la clasificación de los hornos industriales de fusión más utilizados.

**TABLA 2**  
**HORNOS INDUSTRIALES DE FUSIÓN [2]**

<b>Tipo de Energía</b>	<b>Horno</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Química</b>		
Combustible sólido	Cubilote	Hierro colado, a veces aleaciones de cobre
Combustible granular (cisco)	Horno de hogar abierto	Acero
Combustible líquido (petróleo)	Horno basculante, Horno rotatorio	Hierro colado, acero, aleaciones de cobre, metales ligeros
Combustible gaseoso (gas)	Horno de crisol	Metales no ferrosos
<b>Eléctrica</b>		
Arco	Horno de arco: Directo e indirecto	Acero, hierro colado
Inducción	Horno de inducción: • Alta frecuencia • Baja frecuencia	Acero, hierro colado Cobre, aleaciones de aluminio
Resistencia	Horno de resistencia	Aleaciones de aluminio y de cobre

De esta tabla se observa que los hornos se clasifican en hornos de combustible y hornos de electricidad. En la industria ecuatoriana, la mayoría de los hornos que se utilizan son los de combustible. A continuación se hará una breve descripción del horno que será utilizado para la realización de esta Tesis.



El Horno de crisol fijo de coque, fuel-oil o gas es el tipo más sencillo de horno, y se utiliza para aleaciones de metales no ferreos. En las fundiciones que trabajan con hierro fundido puede tener empleo para efectuar coladas pequeñas y urgentes. Puede emplearse en acero, más ésta no es una práctica muy común. La figura 1.1 muestra los componentes de su construcción: un crisol de grafito, ladrillos refractarios, quemador, entre otros. El crisol puede alcanzar temperaturas muy elevadas y la carga metálica que contiene se funde sin entrar en contacto directo con los gases de la combustión.

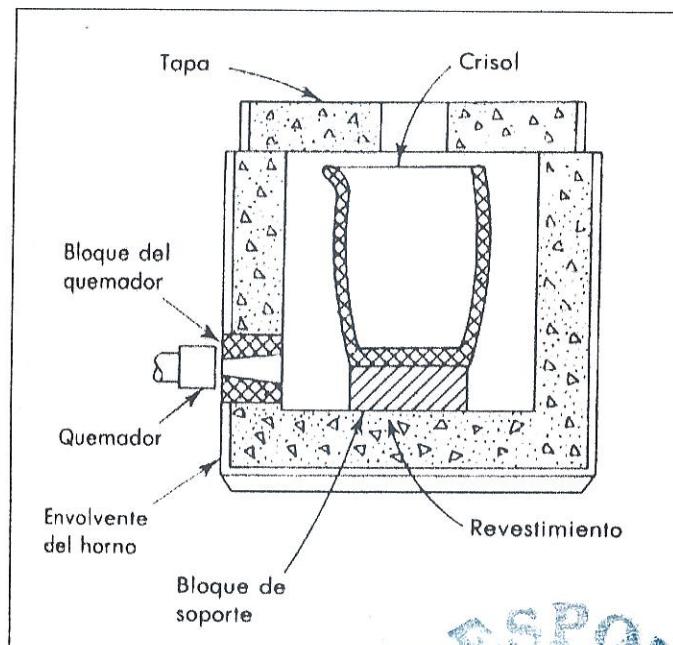


FIGURA 1.1. PARTES CONSTITUYENTES DE HORNO DE CRISOL FIJO [1]



El elemento más importante es el crisol, compuesto de grafito de Ceilán o de Madagascar, con la adición eventual de carburo, mezclado con aglutinantes adecuados, por ejemplo, arcilla o alquitrán. Los crisoles se construyen con estampas de acero sobre las cuales es fuertemente prensado el material de aquéllos. Se acaban en el torno y después de secados se introducen en cajones de material refractario y se someten a cocción en hornos adecuados a temperaturas muy elevadas.

Los crisoles se clasifican por puntos, entendiendo por punto el contenido en peso de 1 kg de cobre líquido (es decir, un crisol de 100 puntos puede contener 100 kg. de cobre fundido). El crisol donde se efectuarán los ensayos durante la realización de esta Tesis, posee una capacidad de 60 kg.

Este horno lo constituyen los siguientes elementos:

- Un quemador de premezcla de 500 000 a 1'000 000 Btu/h, y con un consumo de combustible de 4 – 7 galones de Bunker por hora.



- Una chimenea de 0,20 m de diámetro y 1,00 m de altura, puestos para las pruebas.
- Ladrillos refractarios de alta alúmina (90%) que soportan hasta una temperatura de 1 800 °C.
- Soplador de alta presión – 280 cfm (0,122 m<sup>3</sup>/s) y 1,63 lb/in<sup>2</sup> (11 207 N/m<sup>2</sup>) 1 HP de potencia

Estos elementos se los puede observar en las fotos del apéndice A.

En la figura 1.2. se pueden observar algunas formas de crisoles existentes, y en la figura 1.3. se aprecian algunos de los utensilios que se emplean para su extracción del horno.

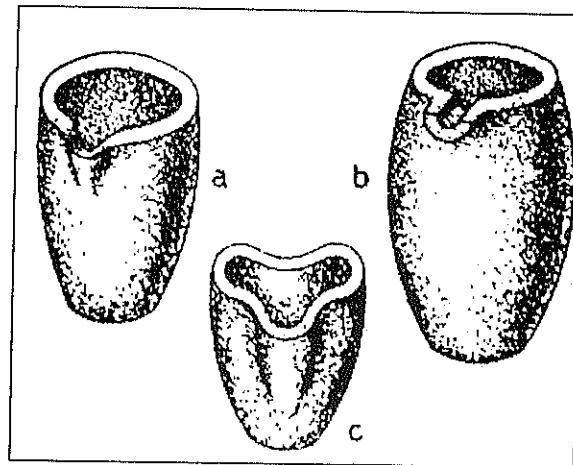


FIGURA 1.2. FORMA DE CRISOLES DE GRAFITO A: FORMA NCRMAL, B:  
FORMA DE OLIVA, C: FORMA DE TRÉBOL [2]

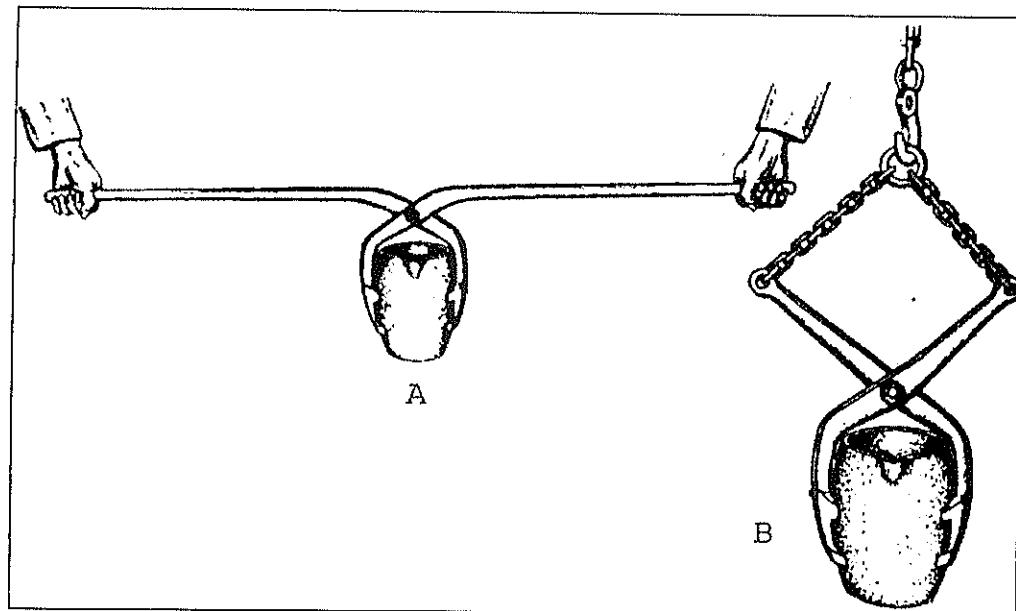


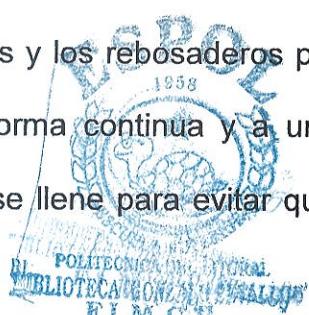
FIGURA 1.3. FORMAS DE EXTRACCIÓN DE UN CRISOL DE UN HORNO FIJO; A:  
PINZAS, B: POLIPASTO ELÉCTRICO [2]

En el horno en el que se realizan los ensayos, se utiliza el crisol de forma normal, y la forma de extraer el crisol de horno, por lo general es por medio de pinzas.

#### **1.1.6. Sexta Etapa: Colado del Metal**

La práctica común es dejar correr el metal fundido desde el cubilote o el horno en un gran cucharón receptor. De éste, se distribuye el metal a cucharones más pequeños para el vertido. Éstos varían en tamaño desde los que puede manipular un hombre hasta enormes cucharones de grúa que sostiene cientos de toneladas. Los fondos de los cucharones y los lados de los cucharones grandes se revisten con ladrillo refractario. Los fondos y los lados de un cucharón se enjarran con una capa interior de arena refractaria y arcilla que se endurecen por horneo.

El metal líquido puede suministrarse a un molde en uno o más cucharones. El punto importante es tener metal suficiente para llenar el molde, las compuertas y los rebosaderos por completo. El vertido debe hacerse en forma continua y a una velocidad uniforme hasta que el molde se llene para evitar que la escoria



se asiente. La temperatura del metal debe ser lo suficientemente alta para que el fluido se vierta con facilidad y rapidez. La escoria está siempre presente en el hierro fundido a cierto grado y debe mantenerse fuera del molde para evitar bolsas débiles de escoria en el colado.

#### **1.1.7. Séptima Etapa: Desmoldeo**

En esta penúltima etapa se debe retirar la pieza fundida del molde, para luego proceder a darle el acabado final por medio de las máquinas herramientas, tales como el torno, fresa, rectificador, esmeril, pulidora, entre otras.

### **1.2. Problema de la Quema de Aceite Lubricante Usado y Otros Combustibles Líquidos**

El ambiente en que vivimos cambia continuamente debido a las causas naturales, sobre las que tenemos poco control. Entre las causas naturales, que causan mayor daño al ambiente se encuentran las manchas solares, las erupciones volcánicas, terremotos, vientos huracanados, inundaciones e incendios forestales.



La agresión antropogénica hacia el medio ambiente ha sido cada vez más importante, desde la revolución industrial, debido al crecimiento de la población y el enorme incremento en el consumo personal, principalmente en los países industrializados. Lo que caracteriza estos cambios ambientales causados por la humanidad es que ocurren en cortos períodos de tiempo (normalmente décadas). Como resultado, nuevos problemas en el campo ambiental se han convertido en objeto de estudio y gran preocupación, principalmente los que se muestran en la tabla 3.

**TABLA 3**  
**PRINCIPALES PROBLEMAS AMBIENTALES [3]**

Problema medioambiental	Principal fuente del problema	Principal grupo social afectado
Contaminación del aire urbano	Energía (industria y transporte)	Población urbana
Lluvia ácida	Energía (consumo de combustibles fósiles)	Todos
Disminución de la capa de ozono	Industria	Todos
Efecto invernadero y cambio climático	Energía (consumo de combustibles fósiles)	Todos
Disponibilidad y calidad de agua potable	Incremento de la población, agricultura	Todos
Degradación de las costas	Transporte y energía	Todos

De la tabla 3 se destaca que la contaminación del aire y la lluvia ácida se deben en gran parte a la quema de combustibles fósiles y al

transporte urbano. El efecto invernadero y el cambio climático son debidos principalmente al uso de los combustibles fósiles. En algunas otras situaciones ambientales, el combustible no juega un papel dominante, pero, no obstante, es importante de manera indirecta, como en la degradación del mar y las costas que se debe en parte a los derrames de petróleo. A continuación se verá con más profundidad los problemas que conciernen a la quema de combustibles fósiles líquidos.

### **1.2.1. Problemas de la Ignición de los Combustibles Fósiles Líquidos**

En la operación de toda Fundidora de Metal, que utiliza hidrocarburos de petróleo en su combustión, se verifica la emisión al aire ambiente de diferentes sustancias contaminantes. Los principales contaminantes del aire emitidos son los Óxidos de Nitrógeno –NO y NO<sub>2</sub>, designados en términos generales como NO<sub>x</sub>–, el Dióxido de Azufre --SO<sub>2</sub>--, el Monóxido de Carbono (CO) y finalmente el llamado material particulado --PM--. De acuerdo al marco legal vigente en Ecuador, son designados como contaminantes del aire, sujetos a límites permisibles de emisión, el



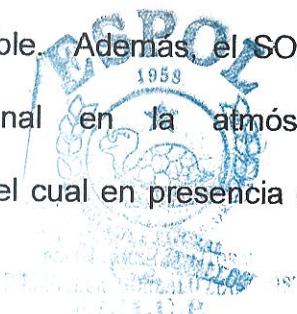
## Dióxido de Azufre SO<sub>2</sub>, los Óxidos de Nitrógeno NO<sub>x</sub> y el Material Particulado PM.

Existen otros contaminantes que no están regulados por la Normativa Ambiental Ecuatoriana, mas son parte importante de la contaminación del aire, emitidos desde los combustibles líquidos. Entre estos compuestos se incluyen a los VOC, y a los gases efecto invernadero.

### 1.2.1.1. Contaminación Debida al Azufre

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir SO<sub>3</sub>, éste en contacto con el agua de la combustión o de la atmósfera puede dar lugar a ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como "Lluvia ácida".

Las emisiones de SO<sub>2</sub> se originan debido a la oxidación del azufre presente en el combustible. Además, el SO<sub>2</sub> emitido experimenta oxidación adicional en la atmósfera de combustión, generándose SO<sub>3</sub>, el cual en presencia de vapor



de agua en los gases de combustión forma la denominada "niebla ácida". Se estima que del total de emisión de SO<sub>2</sub> un 3% se oxida en SO<sub>3</sub> (US EPA, 1995, y el ex Instituto Nacional de Energía, 1993).

Otro efecto pernicioso a tener en cuenta es la posibilidad de condensaciones ácidas en los dispositivos de combustión (hornos, chimeneas) si las temperaturas son suficientemente bajas, esto limita la temperatura de expulsión de los gases de la combustión. A presión atmosférica, las temperaturas de condensación ácida son del orden de 160 °C, variando con la composición de los humos.

#### **1.2.1.2. Contaminación Debida al Material Particulado**

La emisión de material particulado, o partículas, se origina a partir de combustión incompleta, de cenizas presentes en el combustible y a la condensación de gases. Así, se definen dos clases de partículas, filtrables y condensables. Estas últimas poseen un tamaño menor a 0,3 micrones. Finalmente, en la combustión de hidrocarburos de petróleo se obtienen emisiones al aire de trazas de metales pesados, tales como

vanadio, berilio, aluminio, hierro, manganeso, níquel, cromo, entre otros, y que la gran mayoría de estos metales se emiten al ambiente en forma de material particulado fino (tamaño de partícula menor a 1 micrón), esto de acuerdo a informes de la US EPA (1995).

#### **1.2.1.3. Contaminación Debida al Nitrógeno**

Los óxidos de nitrógeno se forman a partir del nitrógeno presente en el combustible ( $\text{NO}_x$  del combustible) y a partir de fijación térmica del nitrógeno en el aire de combustión ( $\text{NO}_x$  térmico).

Entre los diferentes efectos perniciosos de estos óxidos ( $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ , denominados conjuntamente como  $\text{NO}_x$ ) se pueden citar:

- Colaboran en la destrucción de la capa de ozono de forma importante
- En combinación con el agua de la atmósfera pueden dar lugar a condensaciones ácidas lo que incrementa la "Lluvia ácida".
- El  $\text{NO}_2$  es un gas venenoso.



La formación del NO se potencia a elevadas temperaturas, a temperaturas inferiores a unos 1.300°C apenas es considerable. El exceso de aire en la combustión también favorece su formación aunque en menor medida que la temperatura. Así las diferentes soluciones que se han propuesto para minimizar estas emisiones en lo posible tratan de disminuir las temperaturas de llama; en principio esto afectaría negativamente al rendimiento de la combustión, por lo que se trata de buscar soluciones que compensen la pérdida de rendimiento. El problema no es sencillo y está lejos de resolverse definitivamente.

#### 1.2.1.4. Contaminación Debida al Carbono

La combustión completa del carbono produce CO<sub>2</sub> que es el principal contribuyente al efecto invernadero. Este componente es una consecuencia inevitable de la combustión.

Si la combustión del carbono no es completa se produce CO, gas tóxico que en concentraciones elevadas puede



provocar incluso la muerte, por lo que se debe evitar al máximo.

La mejor forma de reducir el efecto de estos agentes es la de tratar de conseguir combustiones completas que no produzcan CO, y la de obtener los mayores rendimientos de combustión de modo que se consuma el mínimo combustible necesario, produciendo así la menor cantidad de CO<sub>2</sub>. Otra manera es seleccionar combustibles con menor producción de CO<sub>2</sub> para la misma energía, el mejor en este aspecto es el Gas Natural.

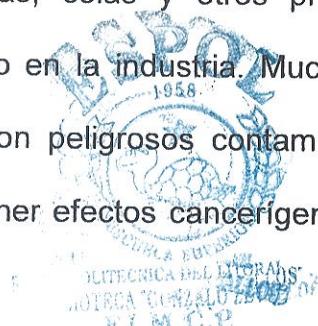
El monóxido de carbono (CO) se origina principalmente en la combustión incompleta del combustible. De acuerdo al marco ambiental vigente, el CO no posee un límite máximo permisible de emisión para el caso de una fuente fija de combustión. Sin embargo, el CO es designado como un contaminante del aire ambiente.

#### 1.2.1.5. Contaminación Debida a Otros Contaminantes

Otros gases de interés son los denominados “gases de efecto invernadero”, principalmente el Dióxido de Carbono --CO<sub>2</sub>--, Metano --CH<sub>4</sub>--, y Oxido Nitroso --N<sub>2</sub>O—. Las emisiones de todos estos gases contribuyen al denominado fenómeno del sobrecalentamiento global, esto es, un aumento en los niveles promedio de temperatura del planeta.

Otro de los contaminantes importantes son los Compuestos Orgánicos Volátiles, llamados VOC por sus siglas en inglés, las cuales son substancias químicas orgánicas. Los compuestos químicos volátiles emiten vapores con gran facilidad. La emanación de vapores de compuestos líquidos se produce rápidamente a temperatura ambiente.

Los VOC emanan de la combustión incompleta de combustibles fósiles líquidos, leña, carbón y gas natural, y de solventes, pinturas, colas y otros productos que se utilizan en el hogar o en la industria. Muchos compuestos orgánicos volátiles son peligrosos contaminantes del aire, los cuales pueden tener efectos cancerígenos. Su emisión



colabora con el problema del smog, efecto invernadero, y quizás en la toxicidad del aire.

### **1.2.2. Efectos en la Salud Debido a los Contaminantes Emitidos por la Quema de Combustibles Fósiles Líquidos**

La tabla 4 muestra los síntomas que resultan de la exposición a algunos contaminantes al igual que los niveles permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

**TABLA 4**  
**CRITERIOS DE LOS EFECTOS EN LA SALUD**  
**DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE DE LA OMS [3]**

Contaminante	Síntomas	Criterios de exposición de la OMS
Dióxido de azufre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irritación respiratoria, pérdida del aliento, impedimento de la función pulmonar, aumento de la susceptibilidad a las infecciones, enfermedades en el tracto respiratorio inferior (especialmente en los niños), enfermedad pulmonar crónica y fibrosis pulmonar.</li>   <li>- Incremento de la toxicidad en combinación con otros contaminantes.</li> </ul>	500 ppm por cada 10 minutos.
Partículas de materia respirables	Irritación, defensas inmunológicas alteradas, toxicidad sistemática, disminución de las funciones pulmonares y agotamiento	No existen criterios sobre efectos en la salud.



Contaminante	Síntomas	Criterios de exposición de la OMS
	<p>cardíaco.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Actúa en combinación con el SO<sub>2</sub>; los efectos dependen de las propiedades químicas y biológicas de las partículas individuales.</li> </ul>	
Óxidos de nitrógeno	<p>Máxima concentración permitida para estar en una exposición continua de 8 horas</p> <p>Irritación nasal y ocular, enfermedades del tracto respiratorio, daños y disminución de las funciones del pulmón y agotamiento cardíaco</p>	25 ppm
Monóxido de carbono	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máxima concentración permitida para estar en una exposición continua de 8 horas</li> <li>- Leves dolores de cabeza cansancio y mareos después de 2 a 3 horas de exposición</li> <li>- Interfiere con la absorción de oxígeno en la sangre (anoxia crónica).</li> <li>- Puede originar daños en el corazón y el cerebro, disminución de la percepción, asfixia; o en dosis menores: debilidad, fatiga, dolores de cabeza y náuseas.</li> </ul>	50 ppm 200 ppm

Todos los combustibles fósiles son tóxicos en cierto grado, más los que gaseosos son los que menor porcentaje de contaminación generan.

### 1.2.3. Problemas de la Ignición del Aceite Lubricante Usado

Las emisiones que se describieron son generadas por combustibles fósiles líquidos, mas las emisiones que se generan por la quema de aceite lubricante usado son mayormente tóxicas, ya que no solamente generan estos contaminantes si no otros que serán descritos en la siguiente sección.

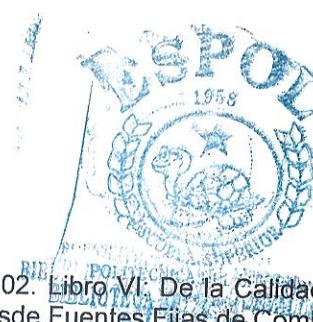
Las emisiones de aceite lubricante usado son las que mas daño causan, por eso su uso es prohibido por la regulación ambiental.

La cual dice lo siguiente:

**"Se prohíbe el uso de aceites lubricantes usados como combustible en calderas, hornos u otros equipos de combustión, con excepción de que la fuente fija de combustión demuestre, mediante el respectivo estudio técnico, que cuenta con equipos y procesos de control de emisiones producidas por esta combustión, a fin de no comprometer la calidad del aire al exterior de la fuente, e independientemente de si la fuente fija es significativa o no significativa... <sup>1</sup>"**

---

<sup>1</sup> Registro Oficial No. 725 del 16 de Diciembre del 2002. Libro VI: De la Calidad Ambiental, Título IV y su Anexo 3; Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión.



En el Apéndice B se puede ver todas las referencias que conciernen a la Norma Ambiental Ecuatoriana.

El aceite lubricante usado es un combustible comúnmente utilizado en las pequeñas empresas, debido a su bajo costo, 0,20 USD/ gal. El horno donde se van a realizar las pruebas ha utilizado como combustibles diesel y aceite lubricante usado. Pero se dejó de usar diesel debido a su alto costo, el cual es 5 veces mayor que el de este aceite de desecho.

Lo que comúnmente se realiza en las industrias para la reutilización del aceite lubricante usado es mezclarlo con el Fuel Oil. El problema es que la mayor parte del plomo que contiene la nafta va en parte hacia la atmósfera y otra parte al aceite, que al quemarlo pasa entonces a la atmósfera.

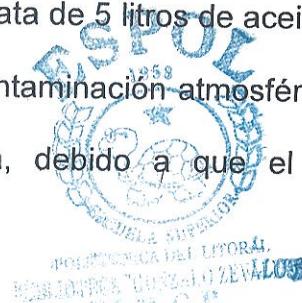
Los compuestos de cloro, fósforo, azufre presentes en el aceite usado generan gases de combustión tóxicos que deben ser depurados por vía húmeda.



Otro gran problema asociado al anterior lo crea el plomo que emitido al aire en partículas de tamaño submicrónico perjudica la salud de los seres humanos, sobre todo de los niños. El plomo es el más volátil de los componentes metálicos que forman las cenizas de los aceites usados, por lo que puede afirmarse que prácticamente, cuando se quema aceite, todo el plomo es emitido por las chimeneas.

La cantidad de plomo presente en el aceite usado oscila entre el 1 al 1,5 % en peso, y proviene de las gasolinas y de los aditivos. Estudios realizados en los Países Bajos han estimado que si llegaran a quemarse las 70.000 toneladas año de aceite usado que pueden recogerse, se recargaría la atmósfera con 350 toneladas adicionales de plomo, lo que representaría una tercera parte más de lo que actualmente emiten los escapes de los vehículos.

Si se opta por quemar una lata de 5 litros de aceite usado, solo o con fuel, se emitiría una contaminación atmosférica, a través de la combustión incontrolada, debido a que el cloro y a los



componentes de metales, que producen gases tóxicos, contaminarían un volumen de aire equivalente al que respira un adulto a lo largo de 3 años de su vida.

La combustión de estos aceites es considerada extremadamente contaminante en muchos países del mundo, ya que ese proceso emite al ambiente también otras sustancias consideradas entre las más peligrosas que haya creado la humanidad, tales como el cadmio, cromo y cinc. Producto de su combustión, se genera cloro, dioxinas, furanos, bifenilos policlorados (Polychlorinated biphenyls, PCBs, por sus siglas en inglés), entre otras cosas. Estas sustancias se liberan mucho más cuando el aceite se quema a temperaturas relativamente bajas.

Por tanto, las instalaciones donde haya de quemarse aceite usado solo o mezclado con fuel-oil, deberán estar dotadas de un eficaz pero muy costoso sistema depurador de gases. De lo contrario, antes de su combustión deberá someterse al aceite usado a un tratamiento químico de refino para eliminar previamente sus contaminantes, pero entonces el aceite que se

obtiene es preferible, desde el punto de vista económico, utilizarlo para ser regenerado.

#### **1.2.4. Efectos en la Salud debido a los Contaminantes Emitidos por la Quema de Aceite Lubricante Usado**

La tabla 5 muestra los síntomas que resultan de la exposición a algunos contaminantes al igual que los niveles permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

**TABLA 5**  
**CONTAMINANTES ADICIONALES DEL ACEITE QUEMADO [3]**

Contaminante	Síntomas	Criterios de exposición de la OMS
Plomo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfermedad de Kidney y deficiencias neurológicas.</li> <li>- Afecta principalmente a los niños.</li> </ul>	0,05 mg/m <sup>3</sup>
Dioxinas y furanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irritación en las vías respiratorias</li> <li>- Enfermedad de Kidney</li> <li>- Problemas severos en la piel</li> <li>- Daños al hígado</li> <li>- Altera el nivel de la glucosa y las hormonas</li> <li>- Ataca el sistema inmunológico y al sistema endocrino.</li> <li>- Provoca defectos de nacimiento</li> </ul>	No determinado



### 1.2.5. Combustible Fósiles Líquidos y Gaseosos Disponibles en el Ecuador

En la tabla 6, se presentan la composición de los hidrocarburos de petróleo que se pueden utilizar en la industria de la fundición.

**TABLA 6**  
**COMBUSTIBLES FÓSILES LÍQUIDOS Y GASEOSOS (1)**

Características	Tipo	Bunker C	Fuel Oil # 4	Diesel 2	GLP
Mezcla	-	-	-	-	70% Propano 30% Butano
Gravedad (° API)	14,7	14,3	13,7	1,65	
Viscosidad Saybolt, a 50 °C SSF	238,7	236,8	2,5 -6 *		N.A.
Azufre (%p)	1,97	1,5	0,7	-	
Cenizas (%p)	0,08	0,12	0,01		N.A.
Poder Calorífico (kJ/kg)	43 720	41 150	46 840	47 212	

A partir de esta tabla, se puede apreciar lo siguiente:

- El combustible con mayor poder calorífico es el GLP, mientras que los combustibles líquidos tienen un poder calorífico similar y menor.

<sup>†</sup> Las características de los combustibles fueron obtenidas de ensayos del laboratorio y de características de combustibles de Petrocomercial, los cuales se pueden observar en el apéndice C.

\* Viscosidad Redwood a 37,8 ° C



- El combustible que posee mayor porcentaje de azufre, es el Bunker C, con esto se espera que sus emisiones, en cuanto a Dióxido de Azufre, sean las mayores. Por el contrario, el GLP solamente contiene trazas de azufre, que sirven para darle olor a este gas naturalmente inodoro.
- Así mismo el combustible con mayor porcentaje de cenizas es el Bunker C, seguido por el Fuel Oil #4.

### **1.3. Evaluación de las Emisiones en Horno de Fusión**

En esta sección se estimará los gases y partículas emitidos por la operación del horno que se está evaluando, mediante factores de emisión. El propósito de la estimación es obtener valores referenciales en cuanto a la concentración emitida al medio ya sea de contaminantes del aire o de gases de efecto invernadero. En el capítulo 4 se analizará las emisiones del horno, por medio de mediciones realizadas insitu.

En esta estimación no se han empleado los datos del fabricante, mas bien se utilizaron factores de emisión típicos para fuentes de combustión que emplean hidrocarburos de petróleo. Estos factores

han sido publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), y poseen un alto grado de confiabilidad. La ventaja de usar estos factores, y no los datos del fabricante, es que la emisión está expresada en masa de sustancia emitida por unidad de volumen de combustible quemado. Así, no se requieren de datos tales como horas de funcionamiento de las unidades, poder calcrífico del combustible, y porcentaje de horas de funcionamiento a diversas cargas. La empresa que se está evaluando, posee un consumo de 7 galones de combustible por hora, en el caso de combustible líquido, y  $6,1 \text{ m}^3/\text{h}$  en caso de combustible gaseoso. En el apéndice D, se puede ver las tablas de factores de emisión utilizadas.

En la tabla 7, se puede observar los datos obtenidos a partir de los factores de emisión.



TABLA 7

**COMPARACIÓN ENTRE CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES  
OBTENIDOS DE FACTORES DE EMISIÓN<sup>1</sup> Y LA REGULACIÓN  
AMBIENTAL ECUATORIANA<sup>2</sup> Y EL BANCO MUNDIAL<sup>3</sup>**

<b>Combustible</b>	<b>Valor Obtenido (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Regulación Ambiental Nacional (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>Criterio de Banco Mundial (mg/Nm<sup>3</sup>)</b>
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )			
Bunker	732		
Fuel Oil Liviano	501	1 650	2 000
Diesel	244		
GLP	1	N.A.	
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )			
Bunker	135		
Fuel Oil Liviano	49	700	165
Diesel	49		
GLP	184	500	
Óxido de Carbono (CO)			
Bunker	13		
Fuel Oil Liviano	13	N.A.	No existen criterios
Diesel	13		
GLP	154	N.A.	
Material Particulado (PM)			
Bunker	25		
Fuel Oil Liviano	17	355	50
Diesel	5		
GLP	5	N.A.	N.A.

<sup>1</sup> Estimación efectuada a partir de factores de emisión típicos para procesos de combustión de fuel oil. Referencia: US EPA, 1995.

<sup>2</sup> Registro Oficial No. 725 del 16 de Diciembre del 2002. Libro VI: De la Calidad Ambiental, Título IV y su Anexo 3; Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión.

<sup>3</sup> Pollution Prevention and Abatement Handbook. World Bank, 1998.

De la tabla 7, se observa:

- Ninguna de las estimaciones de las emisiones de los contaminantes sobrepasa la Regulación Ambiental.
- Solamente la estimación de los NO<sub>x</sub> para el GLP sobrepasaría los criterios del Banco Mundial, mas esto no influye en la Normativa Ecuatoriana.
- Las estimaciones de emisiones del Bunker, tanto para SO<sub>2</sub>, y PM son las que registraron un mayor valor. Las emisiones de GLP son las que obtuvieron la menor magnitud de concentración de los contaminantes.
- En cambio para estimaciones de NO<sub>x</sub> y CO, las emisiones de GLP son las que obtuvieron mayores concentraciones, seguidas por el Bunker.

- Las emisiones de dióxido de azufre dependen directamente del porcentaje de azufre del combustible, por ejemplo se puede



observar que la cantidad de Azufre en el diesel vs. el Fuel Oil, están en una relación 1 a 2,7, mientras que la estimación de las emisiones son de 1 a 3.

- En cuanto a las emisiones de CO, se conoce que no dependen de las propiedades físico-químicas de los combustibles, y el valor de éstos se pueden modificar, controlando cuidadosamente el proceso de combustión.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. Forma de Tratamiento de Residuos Atmosféricos de la Combustión**

#### **2.1. Definición de Residuos**

Se define al residuo como cualquier objeto o sustancia del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse. También se define como residuo, a cualquier elemento o material que queda como inservible después de haber realizado algún trabajo u operación. Un residuo es definido según el estado físico en que se encuentre. Existe por lo tanto tres tipos de residuos desde este punto de vista sólidos, líquidos y gaseosos.

Bajo este contexto las emisiones atmosféricas son residuos de procesos, operación o trabajo. Según el Registro Oficial No. 725 del 16 de Diciembre del 2002, se define emisión como “la descarga de



sustancias en la atmósfera. Para propósitos de esta norma, la emisión se refiere a la descarga de sustancias provenientes de actividades humanas."

## 2.2. Historia de la Gestión de Residuos

En la tabla 8, se puede observar como se ha ido desarrollando en países desarrollados las consideraciones ambientales desde la década de los 50 hasta la actualidad.

**TABLA 8**  
**TENDENCIA HISTÓRICA DE LA**  
**GESTIÓN AMBIENTAL A NIVEL MUNDIAL [9]**

Década (50-60)	Década (70-80)	Década (90-00)
Comienzo del desarrollo de modelos de calidad y emisión	Sistemas de Autorización y Evaluación del Impacto Ambiental (Comando / Control)	Instrumentos Económicos y Códigos Voluntarios de Conducta
Ambiente "libre" o "casi libre"(énfasis en el aumento de la producción)	Actitud Reactiva / Cumplimiento de las Normas Comando / Control	Actitud Pro-Activa / Además del Cumplimiento de las Normas
Dilución de aguas y gases de chimeneas y emisiones	Control en la salida del Proceso ("end of pipe")	Tecnologías Industriales más Limpias / Análisis del Ciclo de Vida
Prácticamente no existe responsabilidad corporativa	La responsabilidad Corporativa se aísla funcionalmente	La Integración Total de la Responsabilidad de la Estructura directiva

De esta tabla se puede observar que nuestro país aun se encuentra en la década de los 70 - 80 en cuanto a la gestión ambiental. Producción más limpia, o sea la prevención, es una de las formas de disminuir el impacto ambiental y ser sustentables económica y técnicamente.

### 2.3 Método Convencional de Eliminar Residuos

El control de la contaminación atmosférica a causa de hornos de fundición, se lo puede realizar con diferentes equipos de control, antes de que los gases sean emitidos hacia la atmósfera.

Solo al final del proceso, cuando ya no es posible la reducción en el origen, ni el reciclaje o reutilización de materiales y se tienen problemas de descargas o emisiones que superan las normas aplicables, se debe considerar la opción de tratamiento y disposición de los residuos.

Aparte de los usualmente altos costos asociados a los sistemas de tratamientos y la dificultad tecnológica por la inexistencia de procesos



POLITÉCNICA NACIONAL  
BIBLIOTECA  
F.I.T.A.C.P.

universales que sean capaces de remover cualquier tipo de residuo. Estos sistemas son ambientalmente ineficientes, porque típicamente separan los contaminantes de un medio, por ejemplo el aire, agua o suelo, obligando a disponerlos en otro, pero sin que necesariamente se reduzca su presencia en términos netos. Por ejemplo, en el caso de las fundidoras, la remoción de contaminantes gaseosos se realiza mediante un "scrubber" húmedo, el cual generará un residuo líquido que, si se somete a tratamiento, generará, a su vez un lodo o contaminante sólido, que eventualmente deberá ser dispuesto en el suelo, conteniendo los mismos contaminantes que fueron separados del medio gaseoso y que potencialmente pueden contaminar el agua.

En la siguiente sección se indican los tratamientos que se pueden utilizar para la eliminación tanto de material particulado como de gases.

### **2.3.1. Tratamiento de Residuos Industriales Gaseosos**

Entre los procedimientos más comunes para tratar las emisiones gaseosas se distinguen los orientados a retener material particulado presente en forma de aerosol, y los que se emplean

para separar los contaminantes (vapores y/o gases) propiamente dichos.

#### **2.3.1.1. Separación de Material Particulado**

Se emplean distintos tipos de equipos que se clasifican de acuerdo con el principio físico o químico utilizado para llevarla a cabo. Se distinguen:

Filtros de aire: Medios porosos capaces de retener partículas y nieblas presentes en el fluido gaseoso que los atraviesan. Actúan en virtud de distintos tipos de interacción con las partículas que retienen, es decir, por intercepción directa, impacto inercial y movimiento browniano, complementadas por la acción de la gravedad.

Sus principales modalidades incluyen filtros de paño compactado, de fibra de vidrio, de carbón activado y de malla de acero. Su selección se basa en el tipo de polvo, su concentración y tamaño del material particulado presente.



Colectores de polvo: Retienen el material particulado como consecuencia de su peso, mediante acción de la gravedad (colectores gravitacionales que separan partículas relativamente grandes 100-200  $\mu\text{m}$ ). Debido a la inercia de las partículas en suspensión en un flujo gaseoso tienden a conservar su trayectoria rectilínea y solo es alterada por aplicación de una fuerza o un obstáculo. Luego éstas caen en un dispositivo de captación (colectores iniciales), y mediante la aplicación de un movimiento rotatorio al gas, de modo que la fuerza centrífuga sobre las partículas sea mayor que las fuerzas de cohesión molecular y de gravedad. Se induce a que aquéllas sean lanzadas contra las paredes, retirándose de la masa gaseosa en escurrimiento (ciclones).

Los colectores de polvos que se aplican a material particulado o fibroso, son económicos, pueden emplearse para gases a temperatura elevada, pero son de bajo rendimiento para partículas con menos de 5  $\mu\text{m}$  de diámetro y se desgastan en un tiempo relativamente corto.



Precipitadores electrostáticos: Proceso físico por el cual las partículas en suspensión en un flujo gaseoso se cargan eléctricamente y son separados de dicho flujo. El sistema empleado consta de superficies colectoras cargadas positivamente (conectadas a tierra) colocadas próximas a electrodos emisores con carga negativa. Debido a la elevada tensión eléctrica existente se generan electrones que bombardean a las moléculas de gas formando iones gaseosos positivos y negativos.

Los primeros se descargan en los electrodos emisores, y los segundos establecen una corriente entre los hilos emisores y las placas, procurando que las partículas de polvo se carguen negativamente y sean retenidas por fuerza electrostática a las placas colectoras de las que, posteriormente, caen por acción de su peso.

Estos se clasifican en filtros de alta tensión (40-100 KV), de baja tensión (10-25 KV) y de una etapa de flujo vertical u horizontal y de dos etapas, por lo general de flujo horizontal.



Filtros de Mangas (Baghouses): Esta clase de equipos de control se componen de filtros tubulares (mangas) de materiales filtrantes, los cuales son usados para colectar partículas. La forma de operación de los filtros es mediante las mangas que colectan las partículas, las cuales forman rápidamente una capa que a la vez actúa como filtro.

La caída de presión aumenta a medida que la capa de material particulado aumenta de espesor. Así como parte de su mantenimiento, la capa de material particulado debe ser removida periódicamente. La clasificación de los filtros de mangas es de acuerdo a la forma de remover la capa de material particulado colectado.

Colectores húmedos: Destinados a retener material particulado y/o gases contaminantes. En el primer caso, el lodo que se separa puede ser reaprovechado después de su separación del líquido mediante filtrado o centrifugación. Por su parte, si se trata de gases solubles, después de su disolución en agua, la solución obtenida puede someterse a un tratamiento químico posterior con el objeto de obtener una

sal o compuesto insoluble. En la figura 2.1. se puede apreciar como funcionan este tipo de mecanismos.

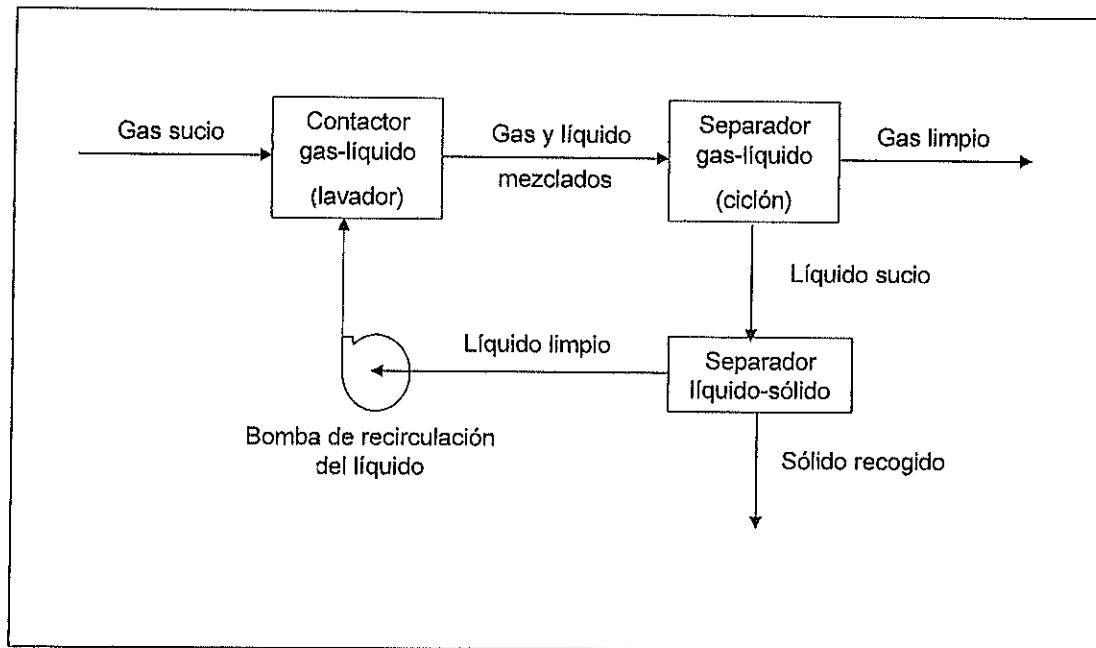


FIGURA 2.1. ESQUEMA DE LAVADOR DE GASES [3]

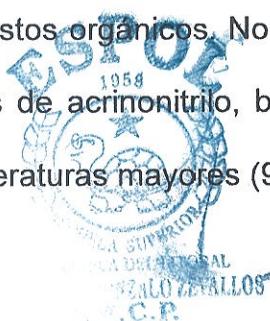
### 2.3.1.2. Separación de gases /vapores

Para tratar los gases y/o vapores contaminantes de emisiones que requieren la separación de aquéllos previo a su disposición a la atmósfera, se utilizan distintos procedimientos:

Incineración térmica o catalítica: Constituye un procedimiento técnicamente confiable y económicamente efectivo, en particular, cuando el poder calorífico de los gases/vapores a quemar es tal que el incinerador puede operar sin el aporte de combustible complementario, siempre y cuando el material sea combustible. Por lo general se emplea gas propano/butano por ser de fácil instalación y operación.

Para que los incineradores sean eficaces requieren asegurar una temperatura mínima de 1 100 °C. Por lo general se alimentan los gases con velocidades comprendidas entre 5 y 8 m/s. sometiéndose a esa temperatura durante un tiempo comprendido entre 1 a 2 segundos, para que la combustión sea completa.

Asegurando una mezcla aire/gases y un tiempo de retención adecuados se logran eficiencias de destrucción del 99.9% de mayoría de los compuestos orgánicos. No obstante, algunos, tales como los vapores de acetonitrilo, benceno, meta-etilcetona, requieren temperaturas mayores (985 °C).



Como alternativa a la incineración térmica, puede utilizarse la catalítica que emplea una cámara de combustión que contiene una capa de catalizador, por lo general a base de platino, a través de la cual se hace pasar al gas/vapor contaminante combustible. Este procedimiento permite oxidar los compuestos a temperaturas más bajas (370 °C) pero, en contrapartida, estos incineradores requieren mayor mantenimiento que los térmicos. Por lo general los incineradores catalíticos se utilizan cuando deben tratarse volúmenes relativamente grandes de emisiones gaseosas diluidas.

Un aspecto que debe tenerse en cuenta en ambas opciones de este tratamiento es el evitar mezclas explosivas (gas/vapor-aire) así como prever la instalación de todos los dispositivos de seguridad necesarios.

### Procesos físicos -químicos

**Condensación:** Consiste en tratar las emisiones gaseosas enfriándolas mediante el empleo de condensadores de superficie o de mezcla. Por lo general, constituye un pretratamiento que permite acondicionar a los gases/ vapores a tratar a posteriori en unidades de incineración, absorción, entre otros.

**Absorción:** Consiste en poner en contacto la emisión gaseosa con un líquido en el cual, el gas sea soluble, existiendo o no una reacción química. Este proceso se lleva a cabo en torre con toberas, con platos o rellena. El lavado de gases por lo general emplea soluciones acuosas de reactivos oxidantes, neutralizantes, entre otros.

La absorción es muy efectiva para una gran variedad de compuestos, alcanzando hasta 95% de eficiencia, pero es ineficaz para tratar hidrocarburos y compuestos con velocidades bajas de reacción. Paralelamente, los reactivos utilizados requieren, por lo general, condiciones especiales

de almacenamiento, manejo y control, con el objeto de minimizar impactos negativos debidos a su naturaleza ácida corrosiva u oxidante.

**Adsorción:** Se basa en la afinidad que poseen algunas sustancias tales como carbón activado, alúmina activada, sílica gel, tierra de diatomeas, etc. de atraer y retener ciertas sustancias en la superficie.

Consiste en hacer fluir las emisiones gaseosas a razón de 10-20 m/ min, a través de capas de la sustancia adsorbente. Se requiere un acondicionamiento previo de las emisiones gaseosas para eliminar material particulado, reducir su humedad relativa por debajo de un 50% y su temperatura a menos de 50°C. Una vez saturado el adsorbente, puede ser regenerado mediante el paso de vapor de agua, lo que produce un efluente que requiere ser tratado, previo a su disposición, en una planta de depuración de residuos líquidos.



Por otra parte, el inconveniente de este procedimiento es la necesidad de disponer del adsorbente una vez agotado irreversiblemente.

#### **2.4. Método de Prevención para Minimizar Residuos**

Un programa de Producción más Limpia consiste de un proceso sistemático, en donde mediante una estrategia económica, ambiental y técnica se integra en los procesos y productos para aumentar la eficiencia en el uso de las entradas y la minimización, reciclaje o eliminación de las salidas de cada etapa del proceso.

El uso de tecnologías limpias representa una opción técnica, económica y ambientalmente apropiada que contribuye al desarrollo sostenible de las empresas, y el país en general.

En el último tiempo, el sector industrial ecuatoriano se ha visto sometido a una gran presión para reducir en forma significativa sus emisiones contaminantes. La que se origina principalmente por las restricciones impuestas en mercados internacionales, especialmente

por la evolución que ha tenido la regulación y fiscalización a nivel nacional. Esto se suma a una creciente sensibilidad social, que se ha traducido en una mayor conciencia de los ciudadanos, consumidores, trabajadores y empresarios sobre la existencia de la contaminación y su impacto sobre la salud y la calidad de vida.

Sin embargo, la dimensión ambiental, no tiene porque ser asumida solo como un costo para las empresas. De hecho, a mayor emisiones o descargas, es posible constatar una mayor ineficiencia en los procesos productivos, que al ser corregida, puede incluso generar beneficios para la empresa, más allá de lo que implica cumplir con las normativas.

Ésta es la esencia del concepto de Producción más Limpia, que consiste básicamente en solucionar un problema ambiental a través de una estrategia ambiental preventiva, que al ser aplicada a los productos, procesos y organización del trabajo, permite usar con mayor eficiencia los recursos materiales y energéticos, y con ello incrementar la productividad y competitividad de la empresa. En forma simultánea, se minimizara las emisiones y/o descargas en la fuente, reduciendo el impacto negativo para el medio ambiente.



Para el manejo de residuos existen tres grandes alternativas de gestión ambiental para la industria, habiéndose demostrado en la práctica, que hay una clara jerarquización respecto del orden en que éstas deben aplicarse, de acuerdo a sus ventajas y desventajas

En orden de conveniencia, es posible distinguir las siguientes alternativas:

- Reducción de Residuos en el Origen, que involucra cambios en los productos y cambios en los procesos productivos (sustitución de materias primas e insumos, cambios tecnológicos y la aplicación de buenas prácticas en la gestión de operaciones).
- Reciclaje (reutilización de materiales o residuos).
- Tecnología de Control, que se aplica al final del proceso («end of pipe») y que comprende el tratamiento de los residuos y su disposición final.

La solución de los problemas ambientales debe ser buscada a través de la aplicación secuencial de las alternativas señaladas, en el mismo orden descrito. Las dos primeras alternativas pueden generar importantes beneficios para la industria, que se traducen en una

mayor productividad y competitividad. En cambio, el tratamiento y disposición final de los residuos solo involucra costos.

Mediante la primera alternativa, generalmente la más simple de aplicar, es posible mejorar algunos sistemas y procedimientos que permiten reducir los volúmenes de desechos en la industria, con lo cual se disminuye en forma sostenible la necesidad de reutilizar o reciclar, y se reduce o elimina la necesidad de un sistema de tratamiento y disposición final.

Adicionalmente a las ventajas directas o indirectas en términos ambientales de la reducción de residuos en el origen, éstas normalmente redundan en una reducción de costos de producción a través de un mejor manejo de materiales y una mayor eficiencia del proceso. La aplicación de la segunda alternativa, el reciclaje o reutilización, aún puede generar beneficios tangibles para la empresa, aunque en menor grado que aplicando la reducción en el origen. Finalmente, el tratamiento y disposición final solo está asociado a costos, en términos de inversión y de operación.



A continuación se revisará el concepto de las alternativas de Producción más Limpia.

#### **2.4.1. Reducción en el origen**

La reducción en el origen elimina o disminuye la necesidad de tratamiento y disposición de los residuos. Incluye el uso racional de los recursos, materias primas, insumos y energía, y el uso de materiales menos nocivos para el medio ambiente. De este modo, la reducción en el origen es una de las alternativas menos costosas para la solución de problemas ambientales, y en muchos casos genera rentabilidades atractivas y bajos niveles de inversión.

Una de las prácticas importante para la reducción de origen, es el cambio de las materias primas o insumos: esto se corresponde al uso de materias primas e insumos que no generen o que generen un nivel inferior de residuos indeseables o peligrosos. El resultado de estos cambios es una minimización de los residuos y una menor exposición de los trabajadores a contaminantes producidos en el proceso manufacturero.

La reducción en el origen, también incluye el mejoramiento de los procedimientos de operación y las denominadas buenas prácticas productivas, genera productos de mejor calidad y con menos problemas ambientales. Dentro de estas prácticas se incluyen las políticas de personal, como capacitación o uso de incentivos, las medidas de prevención de pérdidas y las mejoras en los procedimientos. Estos pueden ser la implantación de sistemas de documentación adecuados, la optimización del manejo y almacenamiento de materias primas, el control de inventarios, la programación de la producción, entre otros.

#### **2.4.2. Reutilización y reciclaje**

Una vez agotadas todas las alternativas de reducción en el origen, se debe poner atención a las posibilidades de reutilizar o reciclar materiales o insumos, dentro o fuera de la industria. Esto permite reducir los volúmenes de residuos a ser dispuestos, transformándolos en un insumo más dentro del mismo proceso productivo u otro.

Aunque la reutilización y el reciclaje de residuos generalmente no son tan efectivos como la reducción en el origen, estas

alternativas permiten reducir los volúmenes de residuos a ser dispuestos, transformándolos en un insumo más dentro del mismo proceso productivo u otro, y pueden tener un retorno económico que puede exceder o no los costos involucrados.

El tratamiento de disposición de residuo solo se debe aplicar cuando ya no es posible ninguna de las alternativas anteriores.

Este tema fue tratado en la sección 2.3.

## **2.5. Comparación de los Sistemas de Control de la Contaminación y Método de Prevención para Minimizar Residuos**

A continuación se hará una comparación entre el control de la contaminación y la Producción más Limpia.

### **Control de la Contaminación**

- Los contaminantes son controlados por medio de filtros y métodos de tratamiento.



- El control de la contaminación se realiza una vez que los procesos y productos han sido desarrollados y cuando se presentan los problemas.
- El control de la contaminación y las mejoras ambientales constituyen costos para la empresa.
- Los asuntos ambientales son tratados por expertos en este campo.
- Las mejoras ambientales se logran a través de la aplicación de la tecnología.
- Las medidas para lograr las mejoras ambientales deben satisfacer las normas establecidas por las autoridades.
- Por calidad se entiende la satisfacción de los requerimientos del cliente.

### **Producción más Limpia**

- Los contaminantes son controlados en la fuente a través de medidas integrales.
- La prevención de la contaminación es una parte integral del desarrollo del producto y del proceso.
- Los contaminantes y desperdicios son considerados como recursos que pueden ser transformados en productos útiles.
- Las mejoras ambientales son responsabilidad de todos quienes forman parte de la empresa.
- Las mejoras ambientales incluyen aspectos técnicos y no técnicos.
- Las medidas de mejoras ambientales forman parte de un proceso de mejora continua por lograr mayores rendimientos.

- Las medidas de mejoras ambientales forman parte de un proceso de mejora continua por lograr mayores rendimientos.
- La calidad total reside en la elaboración de productos que satisfacen las necesidades de los clientes con un mínimo impacto sobre la salud humana y el medio ambiente.

# CAPÍTULO 3

## 3. PROPOSICIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para definir una solución, primero se debe definir ciertos términos de importancia para la misma, como son el significado de la combustión y las implicaciones que existen dentro de esta, además de la utilización de los quemadores.

La combustión se define como un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre tres elementos: el combustible: sólido, líquido o gaseoso y el comburente: oxígeno.

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices, la combustión no puede llevarse a cabo, (Ver Figura 3.1). El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está

compuesto prácticamente, por 21% Oxígeno ( $O_2$ ) y 79% Nitrógeno ( $N_2$ ); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura con llama oxiacetilena). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos. Al comienzo de la combustión estable es la propia llama la que suministra la energía de activación necesaria para prender la mezcla fresca.

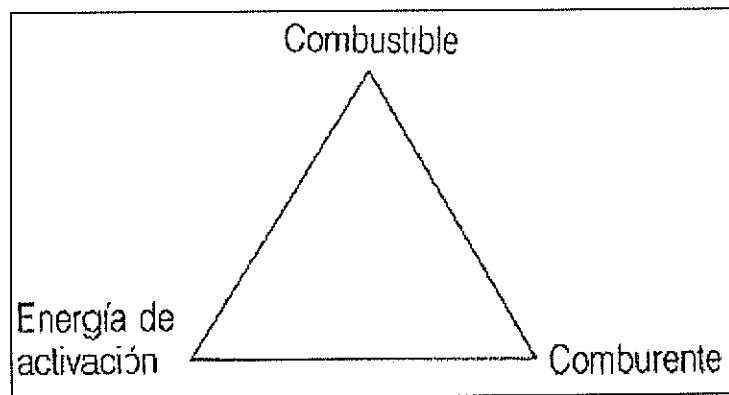


FIGURA 3.1. TRIÁNGULO DE LA COMBUSTIÓN

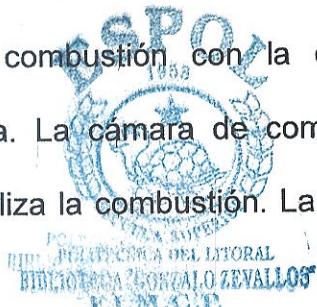
Para que se realice una buena combustión, se necesita de ciertos requisitos que pueden resumirse en lo siguiente:

- El suministro de aire debe ser tal que debe garantizar la suficiente cantidad de oxígeno para una combustión completa.

- El aire debe suministrarse en forma continua durante todo el tiempo con el fin de que el oxígeno del aire llegue a estar en contacto con las substancias oxidables del combustible.
- Los gases deben mantenerse sobre la temperatura de ignición hasta que la combustión se complete. Teóricamente mientras más eficiente sea la combustión, máxima va a ser su temperatura resultante. En la práctica hay factores que disminuyen su eficiencia, tales como el exceso de aire, disociación, transferencia de calor, entre otros.

Una de las formas de mejorar la combustión es precalentar el aire. Esto consiste en suministrar aire, a temperaturas mayores que las del ambiente a la combustión, con lo que se permite aumentar la temperatura adiabática y por ende, un aumento de la cantidad de calor radiado para la misma cantidad de combustible quemado.

También se debe tomar en cuenta que para mejorar las condiciones de la combustión, y más si se va a enriquecer la mezcla, se debe hacer una correcta separación de la cámara de combustión con la cámara de transferencia o cámara de carga térmica. La cámara de combustión se presenta al inicio del horno, donde se realiza la combustión. La cámara de



transferencia o de carga térmica, se origina porque el calor siempre es cedido a través de diferentes formas: conducción, convección y radiación.

En la cámara de transferencia siempre va a decrecer la temperatura debido al calor cedido. Es importante separar físicamente la cámara de transferencia de la cámara de combustión. Por eso en la parte inferior del horno (o en aquella que esté mas cercana al quemador), debe estar correctamente aislado, para que no existan perdidas por transferencia de carga, y de esta manera poder mantener por más tiempo la temperatura máxima de la llama.

Existen pérdidas en el horno debido a transferencias de calor. Cuando el calor es liberado en la combustión, al quemarse el combustible en su recorrido, el calor de los gases de combustión es cedido parcialmente a la carga. Parte de este calor pasa a través del techo, paredes, y piso del horno, aumentando la temperatura de estas partes, esta energía luego será perdida en el ambiente, por radiación y convección desde la superficie exterior de las paredes, o por conducción al suelo. La otra parte de calor sale con los productos de combustión, ya sea en forma de calor no liberado de los combustibles que escapan sin quemar – combustión incompleta.

Además, también pueden existir pérdidas menores a través de ranuras y otras aperturas que radian hacia fuera.

Uno de los aspectos más relevantes en cuanto a transferencia de calor es el calor perdido por las paredes del horno. Para un flujo calorífico uniforme a través de una pared, la temperatura de los productos de combustión, excede la temperatura de la superficie interior de la pared. La temperatura de la pared disminuye apresuradamente cuando se aproxima a la superficie exterior, donde la temperatura sobrepasa ligeramente la del ambiente. Mientras mayor es el grosor de la pared, mejor es el material aislante, o la superficie exterior de la pared es de tal naturaleza que no permite pasar el calor con rapidez al medio ambiente, entonces la pérdida de calor por una superficie de pared dada y para una determinada temperatura del horno es menor.

Una vez que se ha observado estas limitante se puede describir las formas de enriquecimiento del aire con oxígeno, el cual consiste en aumentar la relación del oxígeno en el aire. Este aire toma el nombre de aire enriquecido, con esto se logra elevar la temperatura adiabática de la llama. Se necesita tomar ciertas precauciones para la utilización de este aire y de



esta forma evitar el deterioro de los equipos debido a que la temperatura de trabajo aumenta considerablemente.

El efecto máximo se obtiene remplazando todo el aire con oxígeno, mas este caso rara vez se justifica. En el capítulo 4 se determinará el nivel óptimo para combustibles tanto gaseosos (GLP) como líquido (Diesel).

El enriquecimiento del aire con oxígeno, es utilizado preferentemente en procesos de fundición, con la finalidad de elevar la temperatura de la llama y junto con ello disminuir el volumen de los residuos de la combustión.

Ya que el oxígeno es el 20,9 % de volumen de aire, cada vez que el aire es empleado en un proceso de combustión, se está adicionando una capacidad volumétrica de un 79,1 % de gases, principalmente nitrógeno, que no participa activamente de la combustión.

La temperatura de llama se ve afectada por esta masa de gases que ingresan a la combustión fríos como el oxígeno, y que además absorben energía de la llama enfriándola. Al aumentar la cantidad de oxígeno en el aire, más allá del 21 % inicial se aumenta significativamente la temperatura

de la llama alcanzada por cualquier combustible. En la figura 3.2 se puede observar el efecto del oxígeno sobre la llama.

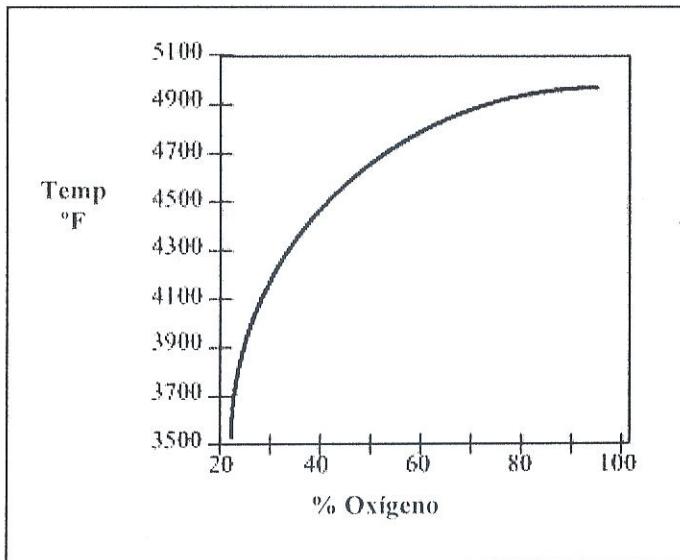


FIGURA 3.2 EFECTO DE ENRIQUECIMIENTO CON OXÍGENO SOBRE LA  
TEMPERATURA ADIABÁTICA DE LA LLAMA [12]

Las temperaturas de llama más altas en el horno mejoran la transferencia térmica a la carga, se sabe que estos mecanismos pueden ser conducción, convección y radiación. En las siguientes ecuaciones se explica claramente como se relacionan las temperaturas dentro del horno.



$$\text{Conducción: } Q\alpha(T_f - T_p) \quad \text{Ec. 3.1.}$$

$$\text{Convección: } Q\alpha(T_f - T_p) \quad \text{Ec. 3.2.}$$

$$\text{Radiación: } Q\alpha(T_f^4 - T_p^4) \quad \text{Ec. 3.3.}$$

De estas relaciones se observa, que a la temperatura de fusión de los metales, la radiación es la modalidad dominante de la transferencia térmica. Las velocidades de transferencia térmica de la conducción y la convección dependen linealmente de la diferencia de temperaturas entre la llama y el metal, a diferencia del calor por radiación, en el cual temperatura de la llama y el producto está cada una elevada a la cuarta potencia. Con estas relaciones se puede observar que la radiación, es la forma predominante de transferencia térmica.

En los hornos de fusión se busca obtener máximas temperaturas, a fin de que se mejore la operación del horno, para poder realizar las aplicaciones en las que estén involucrados los metales ferrosos, hierros fundidos y aceros.

Como ya se describió, el enriquecimiento con O<sub>2</sub>, aumenta la temperatura y mejora los parámetros en la combustión. Para enriquecer el aire de combustión con oxígeno, se pueden utilizar los siguientes procedimientos.

- Enriquecimiento Suplementario
- Enriquecimiento Equivalente

El Enriquecimiento Suplementario se lo realiza incrementando oxígeno y combustible, lo cual aumentará la tasa de combustión total.

El Enriquecimiento Equivalente: para este caso, el flujo de aire de combustión es reducido, y la pérdida de aire es reemplazado por un incremento de oxígeno. En este caso la tasa de combustión permanece inalterada.

Existen algunos métodos de enriquecimiento equivalentes del oxígeno, como se detallará a continuación:

- El enriquecimiento con oxígeno premezclado.- uno de los métodos más comunes para enriquecer el aire de combustión con oxígeno es



por medio de la Técnica de Premezclado. Utilizando un difusor en la línea de alimentación del aire para mezclar oxígeno puro con el aire de combustión antes de que llegue al quemador (Ver la Figura 3.3). Esta técnica también permite efectuar un mejor control del proceso general de combustión y minimiza la inversión de capital y las modificaciones al horno.

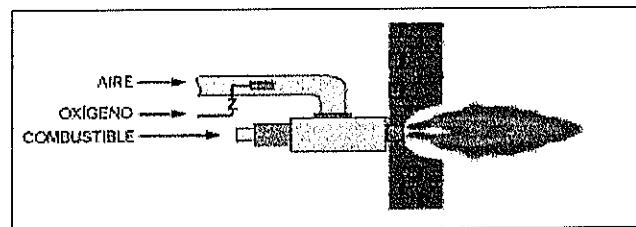


FIGURA 3.3. ENRIQUECIMIENTO CON OXÍGENO PREMEZCLADO [12]

Las limitantes de esta técnica, es que se puede llegar a enriquecer hasta un 30 % de concentración de oxígeno en la corriente de aire, debido a las características propias de los materiales del horno y el quemador.

- La inyección de oxígeno mediante lanzas.- ha sido el modo más rentable de aplicar oxígeno para complementar la combustión de aire combustible. La inyección de oxígeno al lado, debajo o a través de las

llamas de aire combustible ha permitido que los fundidores de vidrio alcancen los objetivos en términos de tasa de producción, eficacia del combustible y calidad. Los beneficios de la inyección de oxígeno aumentan al tener la mezcla de oxígeno con el combustible en el punto donde es más necesario; es decir donde las llamas aire combustible tienen un mayor impacto sobre la transferencia de energía. En la figura 3.4 se puede ver un esquema de este método.

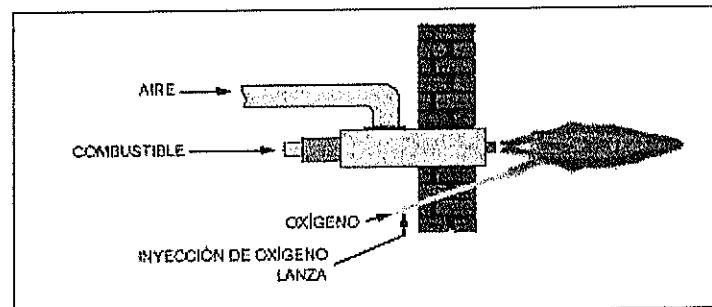


FIGURA 3.4. INYECCIÓN DE OXÍGENO MEDIANTE LANZAS [12]

- Apoyo con Quemadores Oxígeno – Combustible: Esta nueva clase de quemadores de oxígeno-combustible, han sido desarrollados para la conversión total de hornos a 100% de oxígeno-combustible. Esta clase de herramienta se suele utilizar para aumentar la tasa de fusión en un horno que ha alcanzado su producción nominal o que se ha

estropeado debido a una anomalía o una pérdida de eficacia del sistema de combustión aire-combustible.

En las pruebas realizadas en el horno convertidor se utilizó la técnica del oxígeno premezclado en el aire, pero se le añadió hasta un 30 % del volumen del aire.

### Quemadores

Como se dijo al comienzo de esta sección, es importante conoce es el funcionamiento del quemador, y los diferentes tipos de quemadores – lo cual se explicará en la siguiente sección-. El quemador es un componente cuyo propósito principal es de mezclar y dirigir el flujo de combustible y aire de tal manera que se asegure el encendido rápido y la combustión completa.

El sistema de quemadores persigue los siguientes objetivos:

1. Dirigir las llamas para una mejor liberación del calor.
2. Iniciar y mantener la ignición.
3. Mezclar el aire y el combustible.
4. Atomizar los combustibles líquidos.
5. Mantener la proporción entre el combustible y el aire.

6. Suministrar el combustible y el aire a velocidades y presiones que faciliten los objetivos anteriores con seguridad.

Los aspectos más importantes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar el sistema de combustión son los referentes a la liberación del calor, al tamaño de la cámara de combustión y a las temperaturas de precalentamiento.

El corazón de cualquier quemador está representado por su extremo, el cual consta de una boquilla simple o múltiple. Existen muchas variedades que dependen del tipo específico de quemador. Este extremo deberá encontrarse bien refrigerado para protegerlo de la destrucción térmica por la radiación procedente de la llama y del horno y también para prevenir el efecto "flash back" (retorno) de la llama en los quemadores con mezcla previa. Los materiales más comunes son hierro gris y aleaciones de alta resistencia al calor, aceros inoxidables – especificación ASTM 297- y los materiales refractarios, metálicos o cerámicos. Un componente importante del quemador es un bloque refractario que presenta en el centro un agujero cónico o cilíndrico (túnel de la llama); además de servir como aislante entre el horno y las partes más frías del quemador, este elemento irradia calor al aire y al combustible, contribuyendo a mantener la ignición.

Las llamas tienden a ser más estables si se utiliza el componente que se acaba de describir. Los principales componentes del quemador son:

- a. el cuerpo del quemador, que incluye la conexión de aire o mezcla aire combustible y el extremo del quemador,
- b. el soporte que sostiene el cuerpo del quemador, el bloque refractario, el piloto, el sistema de seguimiento de la llama y la carcasa del horno,
- c. la conexión de gas, el tubo y el estabilizador de la llama, y
- d. el atomizador que incluye aceite, conexiones, tubos y boquillas.

Existen diferentes modalidades de quemadores disponibles en función de un gran número de criterios como son el tipo de combustible (gas, líquido, sólido o duales), el tipo de mezcla aire-combustible (quemadores con mezcla previa, con mezcla en el propio extremo del quemador o con mezcla retardada), el tipo de admisión de aire (natural o forzada) o la forma de la llama (plana o alargada). En la figura 3.5, se puede visualizar un esquema de un quemador acoplado a un horno de fusión.

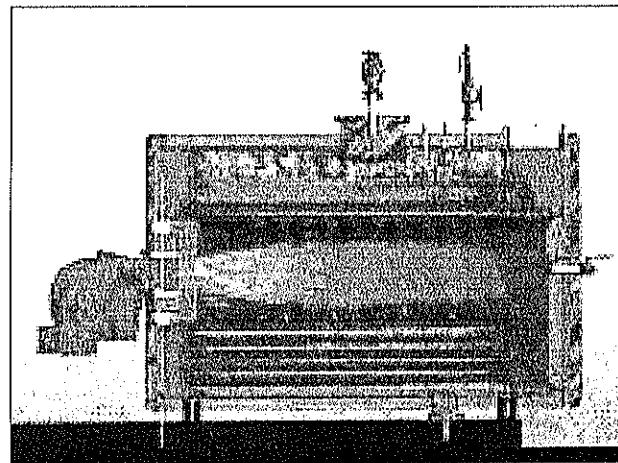


FIGURA 3.5. HORNO Y QUEMADOR [13]

### 3.1. Quemadores a Diesel

#### 3.1.1. Características

Los combustibles fósiles líquidos solo pueden ser quemados por dos formas:

1. Vaporizándolos antes de la ignición, y así poder quemarlos como si fuera gas.
2. Rompiéndolos en fina gotas las cuales serán inyectadas hacia el aire caliente, las que serán evaporadas mientras son quemadas.

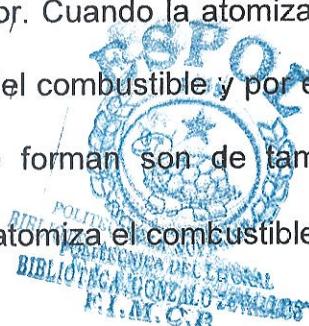
En el primer caso el aparato debe ser algo como una estufa parafínica tipo Primus o una lámpara tipo Tilley y el combustible debe ser refinado, o de alta volatilidad y no debe ser bituminoso o sea no debe ser pesado, denso e impuro. Este tipo de combustible no es muy utilizado en la escala industrial.

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

La atomización se puede dar por los siguientes medios:

- a) Mecánicos, por medio de un disco rotatorio una curvatura o un vórtice.
- b) Por la eyeción de la 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 ( $50\mu$ ). En cambio cuando se atomiza el combustible por



medio de altas presiones el resultado es un rociado 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 más variable de las tres.

En la figura 3.6 se pueden observar algunos quemadores que utilizan combustible líquido. Los quemadores deben ser simples y robustos, pero sus dimensiones y ángulos deben ser diseñadas cuidadosamente y con precisión.

En la figura 3.6 se observa, los siguientes 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) rociado mecánico del combustible por medio de una copa manejada por un impulsor de aire; el aire se vaporiza y luego rompe la lámina en finas gotas; la copa puede ser manejado eléctricamente
- f) la forma de la nariz puede ser hecha para inducir vórtices
- g) los vórtices dan al combustible una expansión adicional.

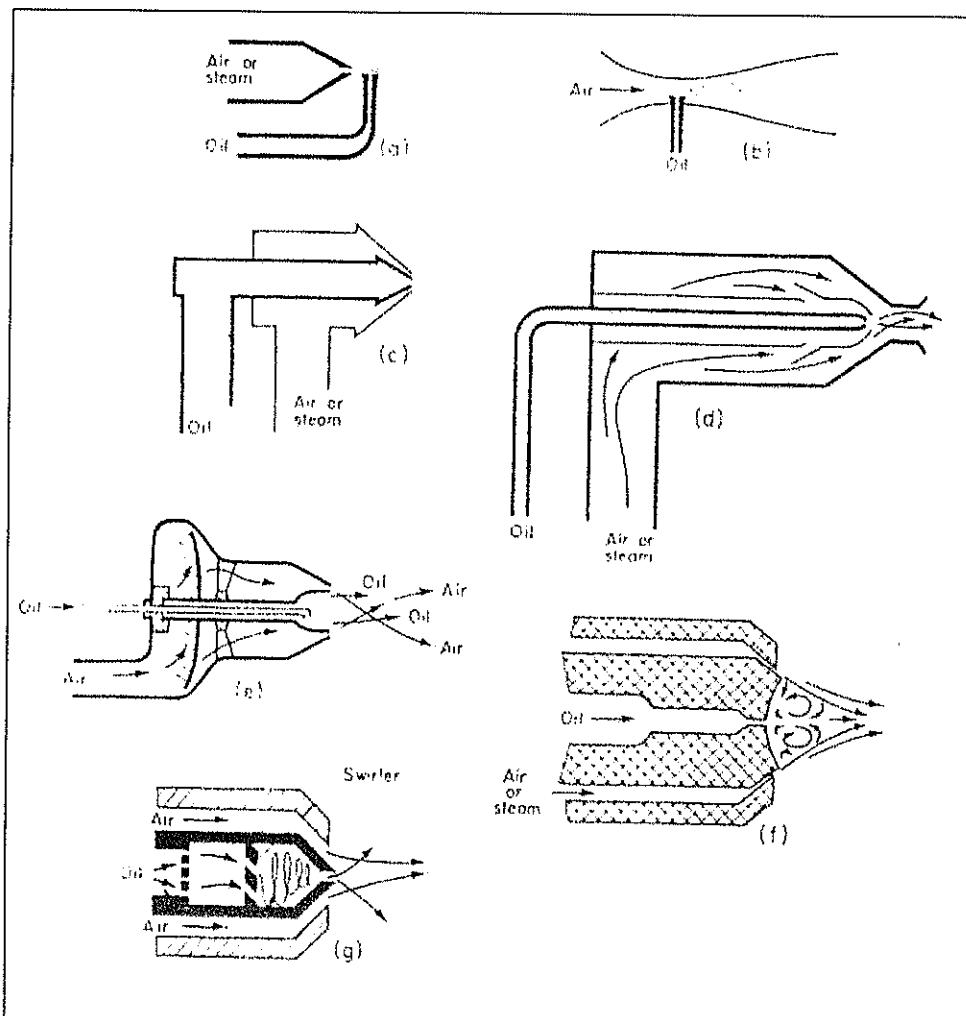


FIGURA 3.6. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ALGUNOS QUEMADORES DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO [13]

La atomización del combustible es la que comúnmente se utiliza en las industrias. Cuando se quema combustible líquido, la reacción de la combustión es generalmente entre el vapor del combustible y el aire. Por ende uno de los primeros

requerimientos de un quemador a diesel o cualquier otro combustible fósil líquido, es que éste debe proveer una vaporización rápida y eficiente del combustible.

Ésta 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, lo que implica que se fuerce al combustible bajo una alta presión a través de un pequeño orificio, la boquilla está diseñada de tal forma que un rociador cónico es producido.

### 3.1.2. Ventajas y Desventajas

VENTAJAS: Estos quemadores tienen ventaja respecto a los otros, por la facilidad del manejo y transporte del combustible, y menor espacio requerido con respecto a los quemadores a carbón. Además poseen alta capacidad para pequeños hornos, y pequeña cantidad de labor requerida.

Otras de las ventajas es la seguridad industrial que provee este tipo de combustible.

DESVENTAJAS: Uno de los problemas de estos quemadores, es el contenido de azufre presente en el combustible, el cual puede causar que las paredes del horno se corroan y existan incrustaciones en las paredes laterales de los quemadores.

El diesel también está compuesto de moléculas complejas de hidrocarburos, éstas son inestables a altas temperaturas y se pueden descomponer al calentarse para formar compuestos gaseosos que se queman prontamente y partículas del carbono que se queman despacio con una llama larga, lo que puede provocar que la llama se impregne en las paredes del horno.

### **3.2. Quemadores a GLP**

#### **3.2.1. Características**

Cuando una molécula de combustible gas natural o GLP es mezclada con oxígeno necesario para su combustión a una temperatura mayor a la de ignición, la combustión se produce casi instantáneamente.

En la figura 3.7, se puede observar la construcción de un quemador a gas típico. En la figura 3.7.A, se ilustra como el gas ingresa a presión a través de la línea de admisión hacia la puerta del quemador, e induce un flujo de aire a través del puerto. En este arreglo la mezcla es pobre, y se produce una llama larga. La llama puede ser acortada por el uso de un quemador de anillo, en el cual el gas fluye a través de un anillo anular e induce un flujo de aire que pasa alrededor y a través del anillo anular (Ver figura 3.7.B). El arreglo de la figura 3.7.C, se utiliza cuando se tiene el aire y el gas bajo presión. Para todos estos quemadores el gas debe fluir a través de la puerta hacia el horno, a una velocidad suficientemente alta, para prevenir que la llama se regrese hacia el quemador. El arreglo de los quemadores y la forma del horno debe ser tal que la llama no se impregne en las paredes del quemador o en las superficies de transferencia de calor.

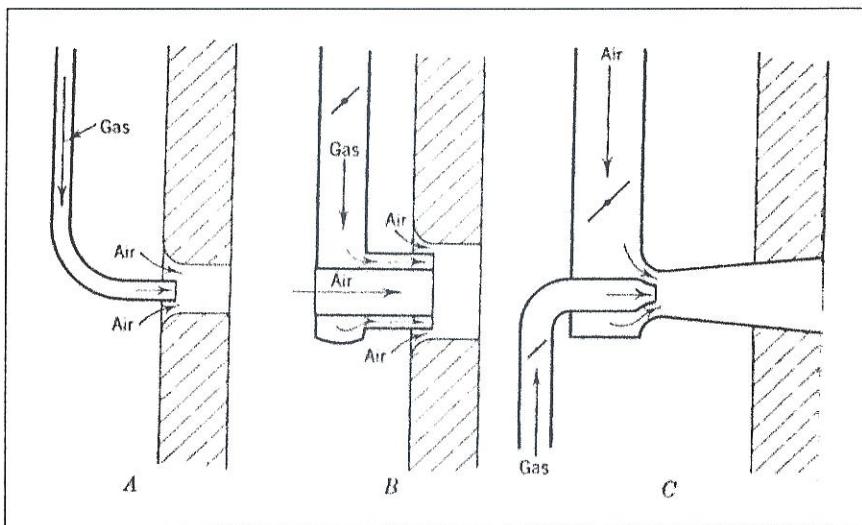


FIGURA 3.7. QUEMADORES TÍPICOS DE GAS [15]

Los combustibles gaseosos varían en la forma de mezclar el aire y el combustible.

Existen dos métodos de quemar los combustibles gaseosos:

1. El gas y el aire pueden ser premezclados fríos y quemados al final de la cámara de premezclado. Los quemadores tipo Bunsen y sus muchas modificaciones son de este tipo. En general solamente una parte del aire necesario para la combustión es mezclado con el gas.

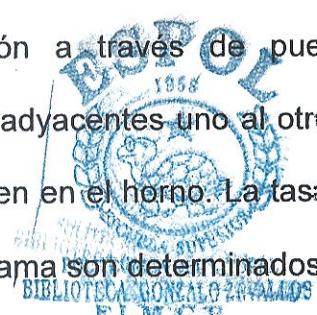


2. El gas y el aire fluyen hacia el horno separadamente y se mezclan juntos mientras la combustión prosigue, este procedimiento a veces se llama difusores de llama.

El quemador tipo (1) es usado en pequeñas unidades donde se necesita mejor control de temperatura. En el quemador tipo Bunsen, el aire es arrastrado por gas que sale por un orificio a alta velocidad, generando vacío a la entrada de aire, y de esta forma lo arrastra y se mezcla con el gas,

En este tipo de quemadores es donde o el combustible o el aire es entregado al quemador y es descargado por medio de una boquilla o por un eyector de tal forma, de que su propio momento es usado en mezclar el gas y el aire, para así entregar la mezcla a una velocidad adecuada.

El arreglo más simple, (el tipo 2), consiste en admitir el aire y el gas hacia la cámara de combustión a través de puertos separados, los que usualmente están adyacentes uno al otro, lo cual permiten 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 acero. Algunas de las condiciones las cuales favorecen a los quemadores tipo de puerto, son la utilización de aire y gas precalentado que igniciona cuando es mezclado, ya sea el gas combustible sucio, y cuando se necesita llamas largas y lentas.

Los siguientes tipos de quemadores se muestran en la figura 3.8.

- a) quemador de Bunsen
- b) versión industrial del quemador de Bunsen
- c) quemador de chorro (jet burner)
- d) arreglo simple de aire inducido
- e) como d) pero con más suplemento de aire
- f) suministro de aire inducido a través del flujo que puede ser precalentado
- g) proporcionador aire – gas.

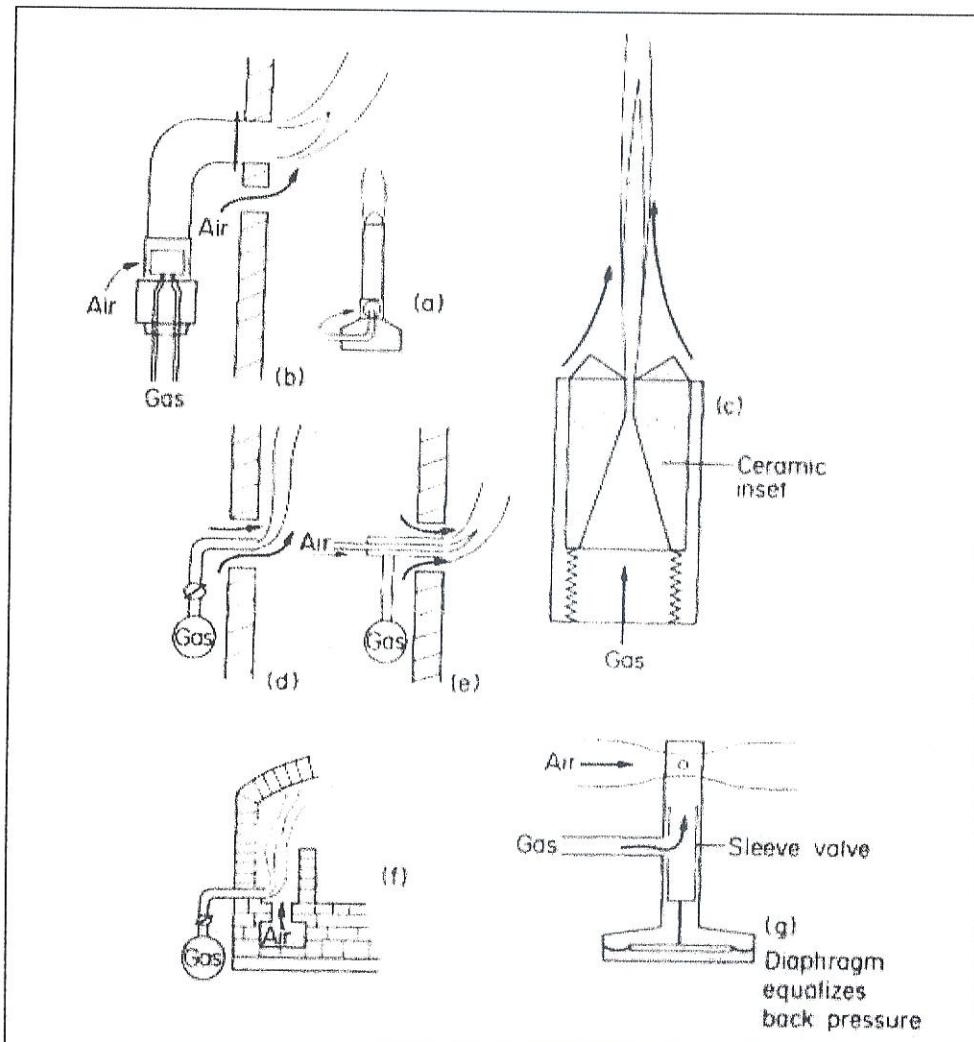
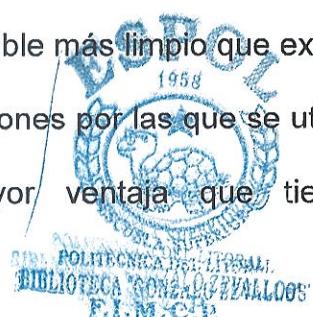


FIGURA 3.8. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ALGUNOS QUEMADORES A GAS [13]

### 3.2.2. Ventajas y Desventajas

VENTAJAS: El gas es el combustible más limpio que existe en la actualidad, esta es una de las razones por las que se utiliza este tipo de quemadores. La mayor ventaja que tienen los



quemadores a gas, es que no hay que preparar el combustible para que sea combustionado, como en el caso de los sólidos o líquidos, en los que se necesita atomizar el combustible.

Otra de las ventajas de usar quemadores a gas es la facilidad de controlar la atmósfera del horno, además de producir una llama larga y lenta con liberación de energía gradual y uniforme. El control de la llama es fácil, debido a la graduación de este combustible.

DESVENTAJAS: Las limitantes de utilizar quemadores a gas, radican paradójicamente en el combustible, debido a la alta explosividad del mismo y la máxima temperatura alcanzada por parte de estos quemadores no es muy alta.

También se debe tener control de que la rapidez del quemador o la propagación de la llama, no exceda la entrega del gas, caso contrario la llama se puede regresar hacia el puerto de mezcla

### 3.3. Quemadores Diales: Diesel y GLP

#### 3.3.1. Características

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 poder 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 por medio de las formas explicadas anteriormente. En la figura 3.9 se muestra un sistema dual en el cual se ve básicamente un quemador con sistema a diesel en el cual se le está inyectando gas. En esta figura se puede observar que el quemador posee dispositivos para la entrada de O<sub>2</sub>, si el usuario quisiera enriquecer la mezcla con éste.



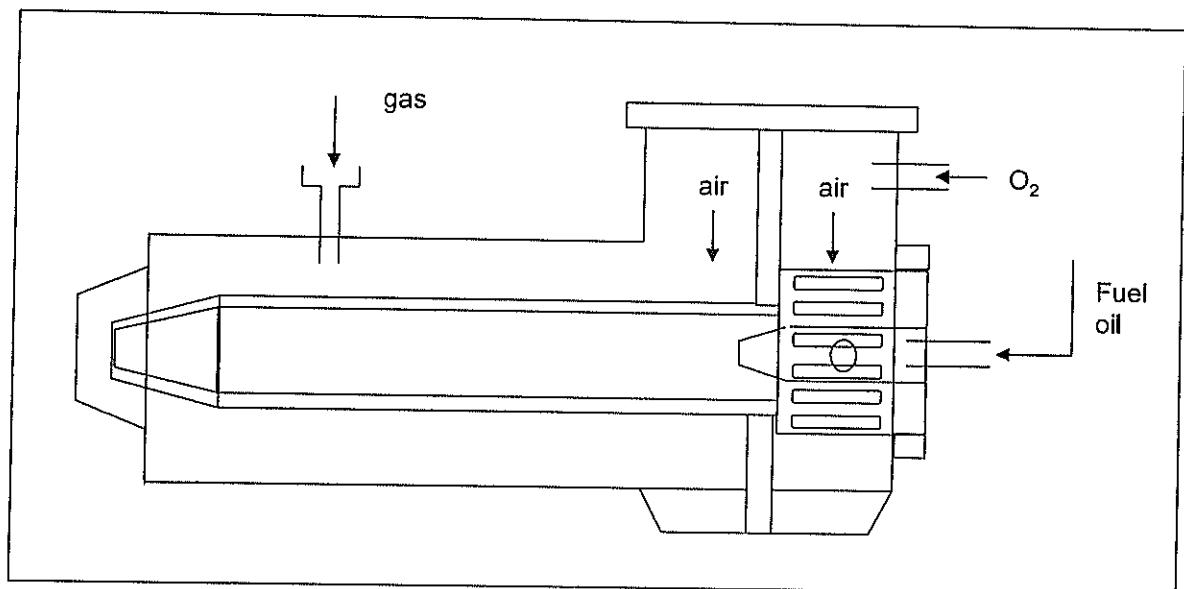


FIGURA 3.9. ESQUEMA DE UN QUEMADOR DUAL: GLP – DIESEL

### 3.3.2. Ventajas y Desventajas

VENTAJAS: Una de las principales ventajas es que con estos quemadores se puede reducir el consumo del combustible líquido, que por lo general es el más costoso. Otras de las ventajas es que combina lo mejor de ambos quemadres, entonces se podrá llegar más rápidamente a la temperatura de fusión del metal.

DESVENTAJAS: Uno de los problemas de estos quemadores, es que se debe cuidar la calidad del combustible líquido para evitar incrustaciones debido al azufre y al vanadio.

Además se debe tener en cuenta que se va a utilizar más dispositivos auxiliares que para el caso del quemador a gas o el quemador a diesel.

# CAPÍTULO 4

## 4. EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES

### 4.1 Pruebas del Horno Convertido

Durante la realización de esta Tesis, se realizaron una serie de mediciones, para conocer cual es la mejor opción para el cambio de combustible. Los ensayos se efectuaron en los siguientes sistemas:

- Aceite lubricante usado + aire
- Aceite lubricante usado y Gas Licuado de Petróleo (GLP) + aire
- Aceite lubricante usado + aire con Oxígeno al 30%
- Diesel + aire
- Diesel + aire con Oxígeno al 25%
- Diesel + aire con Oxígeno al 30%
- GLP + aire
- GLP + aire con Oxígeno al 25%
- GLP + aire con Oxígeno al 30%



- Diesel y GLP + aire
- Diesel y GLP + aire con Oxígeno al 25%
- Diesel y GLP + aire con Oxígeno al 30%

Para cada uno de estos sistemas de combustibles se determinaron los siguientes parámetros:

- ❖ Temperatura de la llama
- ❖ Temperatura del horno
- ❖ Temperatura de la chimenea
- ❖ Gases de combustión
  - Óxidos de Nitrógeno – NO<sub>x</sub>
  - Dióxido de Azufre – SO<sub>2</sub>
  - Monóxido de Carbono – CO
- ❖ Consumo de Combustible

En el Apéndice A se puede observar alguna de las fotos tomadas durante las pruebas para la realización de esta Tesis.

#### 4.1.1. Equipos Utilizados

Para la realización de las pruebas se utilizaron de los ensayos se necesitaron equipos para la medición de los parámetros. Los equipos que se usaron fueron los siguientes:

- Equipo portátil para medición de gases de combustión, marca TESTO, modelo 350
- Equipo portátil para medición de Oxígeno, O<sub>2</sub>, Oxor®, marca BACHARACH
- Equipo portátil para medición de Dióxido de Nitrógeno, NO<sub>x</sub>, Nonoxor® II, marca BACHARACH
- Equipo portátil para medición de Dióxido de Azufre, SO<sub>2</sub>, Dioxor®, marca BACHARACH
- Equipo portátil para medición de Monóxido de Carbono, CO, Monoxor® II, marca BACHARACH
- Termocupla tipo K
- Cronómetro

En el apéndice E se puede observar una breve descripción de los equipos anteriormente mencionados y algunos certificados de calibración.

#### **4.1.2. Resultados de las Pruebas**

Los resultados presentados han sido convertidos a unidades de miligramos por metro cúbico a condiciones normales ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ), a fin de compararlos con los límites máximos permisibles establecidos en la norma ambiental de emisiones al aire. En el Apéndice F de este informe se incluye una descripción del procedimiento utilizado en la conversión de unidades a partir de los resultados obtenidos en mediciones.

A seguir, en las tablas 9 a 12, se presentan un resumen de los resultados obtenidos, para las pruebas descritas anteriormente. Los resultados fueron obtenidos en mediciones realizadas durante los días 1 al 15 de Diciembre de 2003. Las mediciones se realizaron con el horno vacío y con una llama que da una atmósfera reductora. En el apéndice G se puede observar todos los resultados obtenidos en los puertos uno y dos y en el horno.

**TABLA 9**  
**RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS**  
**PARA SISTEMAS QUE UTILIZAN ACEITE LUBRICANTE USADO (1)**

<b>PARÁMETROS MEDIDOS</b>	<b>Aceite – Aire</b>	<b>Aceite – GLP - Aire</b>	<b>Aceite con aire enriquecido con O<sub>2</sub> ( 30 % )</b>	<b>Unidades</b>
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	53,0 (331)	42,5 (173)	66,2 (245)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	75,3 (650)	69,0 (392)	88 (455)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono – CO	76,8 (292)	100,6 (251)	150,8 (338)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Oxígeno en chimenea – O <sub>2</sub>	16,3	13,9	13,2	%
Temperatura de Chimenea	400,4	468,9	482,2	° C
Temperatura de Llama	1 215	1 456	1 506	° C
Temperatura de Horno	962	1 200	1 249	° C
Aspecto visual de los humos en el arranque	Oscuros, se observa humos densos			-

---

<sup>1</sup>Medición se efectuó el 3, 5 y 12 de Diciembre de 2003

**TABLA 10**  
**RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS**  
**PARA SISTEMAS QUE UTILIZAN DIESEL (1)**

<b>PARÁMETROS MEDIDOS</b>	<b>Diesel – Aire</b>	<b>Diesel con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (25 %)</b>	<b>Diesel con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (30 %)</b>	<b>Unidades</b>
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	44,6 (225)	45,8 (180)	33,7 (170)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	56,8 (400)	59,4 (325)	41,2 (288)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono – CO	143,6 (435)	112,9 (264)	75,4 (232)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Oxígeno en chimenea – O <sub>2</sub>	15,2	13,5	15,2	%
Temperatura de Chimenea	446,0	463,9	475,4	° C
Temperatura de Llama	1 238	1 318	1 370	° C
Temperatura de Horno	987	1 065	1 118	° C
Aspecto visual de los humos en el arranque	Café ligeros, no se observó humos densos			-

---

<sup>1</sup>Medición se efectuó el 15 de Diciembre de 2003

**TABLA 11**  
**RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS**  
**PARA SISTEMAS QUE UTILIZAN GLP**

<b>PARÁMETROS MEDIDOS</b>	<b>GLP – Aire</b>	<b>GLP con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (25 %)</b>	<b>GLP con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (30 %)</b>	<b>Unidades</b>
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	20,5 (102)	11,4 (91)	16,1 (77)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	0 (0)	0 (0)	0 (0)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono – CO	531,7 (1 605)	186,1 (934)	281 (823)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Oxígeno en chimenea – O <sub>2</sub>	15,2	17,3	15	%
Temperatura de Chimenea	274,6	328,7	351,9	° C
Temperatura de Llama	1014	1102	1221	° C
Temperatura de Horno	759	854	967	° C
Aspecto visual de los humos en el arranque	Transparentes, no se observó humos densos.			-

<sup>1</sup>Medición se efectuó el 12 y 15 de Diciembre de 2003



**TABLA 12**  
**RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS**  
**PARA SISTEMAS QUE UTILIZAN DIESEL - GLP**

<b>PARÁMETROS MEDIDOS</b>	<b>Diesel - GLP - Aire</b>	<b>Diesel - GLP con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (25%)</b>	<b>Diesel - GLP con aire enriquecido con O<sub>2</sub> (30 %)</b>	<b>Unidades</b>
Óxidos de Nitrógeno – NO <sub>x</sub>	38,8 (198)	37 (164)	28,4 (153)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Dióxido de Azufre – SO <sub>2</sub>	44,8 (322)	27,4 (169)	21,7 (163)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Monóxido de Carbono – CO	143,7 (424)	44,5 (119)	18,5 (61)	ppm (mg/m <sup>3</sup> )
Oxígeno en chimenea – O <sub>2</sub>	15,2	14,5	15,6	%
Temperatura de Chimenea	462,7	494,0	524,3	° C
Temperatura de Llama	1 371	1 456	1 553	° C
Temperatura de Horno	1 119	1 201	1 299	° C
Aspecto visual de los humos en el arranque	Ligeros, no se observó humos densos			-

<sup>1</sup> Medición se efectuó el 3 y 15 de Diciembre de 2003

De lo presentado en las tablas 9, 10, 11 y 12, se obtienen las siguientes observaciones:

- Para emisiones de SO<sub>2</sub>, el combustible que reportó menor valor fue el GLP, cuyo resultado fue 0 ppm, o sea 0 mg/m<sup>3</sup>. En cambio el combustible que obtuvo mayor concentración de este contaminante fue el aceite usado, con una concentración de 650 mg/m<sup>3</sup>, y este valor disminuyó cuando se le inyectó oxígeno y cuando se lo mezcló con GLP, 455 y 392 mg/m<sup>3</sup> respectivamente.
- En el caso de las emisiones de NO<sub>x</sub>, el aceite lubricante usado y el GLP reportaron las mayores y menores emisiones, respectivamente. En el caso del Diesel y del Diesel – GLP, cuando no se inyecta oxígeno las emisiones permanecen alrededor de 210 mg/m<sup>3</sup>, y cuando se mezcla el aire con el oxígeno las emisiones de ambos disminuyen en aproximadamente 50 mg/m<sup>3</sup>.
- Contrario a las otras concentraciones de contaminantes, el CO emitido por el GLP, es el que valor numéricamente más

alto de los combustibles, en cambio el aceite de desecho es el combustible con menores emisiones de CO. Las emisiones de CO para el diesel y el sistema dual: diesel – GLP son similares, ambas están alrededor de  $430 \text{ mg/n}^3$ .

- El porcentaje de oxígeno en la chimenea, registra un valor elevado, esto se debe a que la chimenea no se encuentra completamente acoplada al horno de fusión, esto se debe a la necesidad de un espacio suficiente para ingresar la materia prima al horno. Cabe recalcar que durante las mediciones se trato de cubrir estos espacios mediante planchas de acero, pero igualmente se filtraba aire entre las planchas.
- Probablemente la disminución del porcentaje de oxígeno medido en la chimenea cuando se enriqueció el aire, se debe a errores experimentales por una falta de control en la inyección del aire desde el soplador.
- Un parámetro muy importante para saber cual es el sistema adecuado es la temperatura de la llama y la del horno, debido a que si no llega a una cierta temperatura, entonces

no se podría fundir los metales. La temperatura de referencia sería la que se obtiene mediante el aceite lubricante usado, debido a que es el combustible con el que han estado trabajando. Si se obtienen iguales o mayores temperaturas no habría problema.

- La temperatura de la llama y del horno cuando se utiliza aceite lubricante usado es de 1 215 y 962 ° C, respectivamente. Los sistemas que sobrepasan esa temperatura son el sistema a diesel y el dual (diesel – GLP). Los combustibles mixtos – diesel y GLP- logran alcanzar una mayor temperatura, y si se les agrega oxígeno en el aire de combustión, la temperatura supera la del aceite lubricante usado en más de 330 ° C , aún si se le inyecta oxígeno al aire del aceite lubricante usado el sistema del Diesel – GLP supera a éste con casi 50 °C.
  
- En cuanto al aspecto visual de los humos, cuando se utiliza aceite lubricante usado se observan humos oscuros negriscos y que se veían densos, lo cual indica que hay alta contaminación. En el caso de los sistemas con Diesel, se

pudo ver que el humo era mas bien ligero y de un color café claro. Cuando se utilizó GLP, se percibió un aspecto visual transparente de los humos. No se observó humos densos.

Consumo de Combustible : En cuanto a este parámetro, en la tabla 13, se muestra la cantidad utilizada en cada una de las pruebas que se hicieron durante la realización de esta Tesis.

**TABLA 13**  
**CONSUMO ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE**

<b>Combustible</b>	<b>Combustible líquido (gal/h)</b>	<b>Combustible Gaseoso (kg/h)</b>	<b>Combustible (Kj/h)</b>
Aceite lubricante usado + aire	5,1	-	824 249
Aceite lubricante usado + GLP + aire	1,5	8,1	624 840
Aceite lubricante usado + aire + O <sub>2</sub> al 30%	3,5		
Diesel + aire	7,1	-	1'013 912
Diesel + aire con O <sub>2</sub> al 25%	6,3	-	899 668
Diesel + aire con O <sub>2</sub> al 30%	4,8	-	685 462
GLP + aire	-	14,8	698 738
GLP + aire con O <sub>2</sub> 25%	-	10,0	472 120
GLP + aire con O <sub>2</sub> al 30%	-	8,2	387 138
Diesel + GLP + aire	3,4	13,4	1'118 176
Diesel - GLP + aire con O <sub>2</sub> al 25%	3,0	11,9	990 236
Diesel - GLP + aire con O <sub>2</sub> al 30 %	1,7	6,7	559 088

De esta tabla se puede observar lo siguiente:

- Esta medición es importante no sólo por la viabilidad económica, debido a que se debe cambiar de combustible para cumplir con las regulaciones ambientales, sino también porque mientras se consuman menos recursos, la solución se vuelve ambientalmente sustentable.
- Para el combustible actualmente utilizado en esta empresa, el aceite lubricante usado, se necesitan 5 galones por hora
- Si al aceite lubricante usado se lo mezcla con GLP, el consumo del aceite es de 1,5 galones y el del combustible gaseoso es de 8,1 kg/h.
- Cuando se enriquece el aire con 30 % de oxígeno, el aceite, esta mezcla hace que se disminuya el consumo a un 67 %.



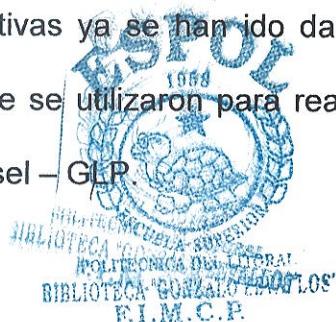
- El cambio de combustible de aceite lubricante usado a Diesel incrementaría el consumo en dos galones, sólo si se enriquece la relación de combustión de aire con 30 % de oxígeno, el consumo de diesel disminuye en 0,3 galones con respecto al aceite lubricante usado.
- Este cambio de sistema aunque provee de una temperatura apropiada para la combustión, posee insumos cuyo costo es demasiado elevado, por ende se encarecería el producto final
- El consumo de combustible del GLP, sin ser enriquecido con oxígeno es 14,8 kg, y decrece en alrededor del 32 y 45%, para el caso de las pruebas donde fueron enriquecidos con oxígeno al 5 y 10% respectivamente.
- El uso de combustibles mixtos, GLP – Diesel, fue el que en consumos es más similar al combustible actualmente utilizado, incluso si se enriquece esta mezcla con

oxígeno, el consumo de combustible gaseoso disminuye en alrededor del 20 %, y el consumo de combustible líquido – diesel – es casi igual al del aceite lubricante usado.

#### 4.2. Matriz de Decisión

La matriz de decisiones es una herramienta muy utilizada para ayudar al proceso de toma de decisiones. Ésta se realiza siguiendo una serie de pasos que incluyen: identificar el problema, identificar los criterios de decisión, asignación de ponderación a los criterios, desarrollo de alternativas, análisis de las alternativas, selección de una alternativa, implementación de la alternativa y evaluación de la decisión.

En el caso de esta Tesis ya se conoce cuál es el problema, el uso de un combustible no permitido, ya se ha identificado los criterios de decisión: técnico, seguridad, económico y ambiental. En las siguientes matrices se podrá ver el valor de ponderación a los criterios. El desarrollo de las alternativas ya se han ido dando, las cuales son los sistemas alternos que se utilizaron para realizar las pruebas: sistema a diesel, GLP y diesel – GLP.



Aunque los criterios de decisión, son sólo cuatro, dentro de estos criterios se ha realizado una serie de subcriterio para cada uno de ellos, para así realizar mejor el análisis de las alternativas. Finalmente se selecciona una alternativa, la cual no va a ser implementada durante el desarrollo de esta Tesis, pero si se la evalúa mediante los resultados de las pruebas realizadas.

#### **4.2.1. Criterios y Ponderación:**

A continuación, en la tabla 14, se puede observar cuales son los criterios usados, y cuál es su ponderación numérica. Cabe recalcar que el rango de ponderación es de 1 a 3, siendo el 3 la calificación más alta para un criterio dado.

**TABLA 14**  
**CRITERIOS Y PONDERACIÓN PARA ESCOGER**  
**EL MEJOR QUEMADOR PARA LA OPERACIÓN DEL HORNO DE FUSIÓN**

Criterio	Ponderación
Técnico	3
Seguridad	3
Ambiental	3
Económico	1

A continuación para cada uno de estos criterios se realizará cuatro matrices de decisión parcial, una de decisión preliminar y finalmente una matriz de selección final.

#### 4.2.2. Matriz de Decisión Técnica

En esta matriz están considerados todos los parámetros técnicos a evaluarse.

**TABLA 15**  
**COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE QUEMADORES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS**  
**BASADAS EN CARACTÉRISTICAS TÉCNICAS**

Mezcla	Tiempo en llegar a la temp. de fusión	Control de flujo mísico de combustible	Temperatura de la llama	Rapidez del encendido	Facilidad de mantenimiento	Eficacia de la combustión	Mezcla aire-combustible	Suministro de combustible -aire	Total
Diesel+aire	2	2	3	2	3	2	2	2	18
GLP+aire	1	3	1	3	3	3	3	2	19
Diesel - GLP + aire	3	3	3	3	3	3	3	2	23
Diesel -aire + O <sub>2</sub>	3	2	3	2	3	3	3	3	22
GLP -aire + O <sub>2</sub>	1	3	2	3	3	3	3	3	21
Diesel - GLP + aire + O <sub>2</sub>	3	3	3	3	3	3	3	3	24

**CALIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS**

**TABLA 16**

Optimo	Bueno	Regular
3	2	1

De esta tabla de resultados parciales, se puede observar lo siguiente:

- El sistema que obtuvo mayor puntaje fue el sistema Dual: Diesel – GLP, más aire enriquecido con oxígeno, éste obtuvo las mayores calificaciones en todos los criterios evaluados.
- El sistema diesel - GLP (Dual) +aire fue el que le siguió en puntaje al anterior, pero debido a que el enriquecimiento con O<sub>2</sub> ayuda a la combustión, el sistema enriquecido con Oxígeno fue mejor.
- Los sistemas que obtuvieron los menores puntajes fueron el diesel y el GLP. El diesel es el que menor puntaje obtuvo, más en los criterios evaluados, la más baja calificación fue bueno.



- Se debe recordar que se debe buscar máximas temperaturas, para que se pueda trabajar con los metales ferrosos, hierros fundidos y aceros.
  
- Aunque el GLP no fue el que obtuvo el menor valor, este tiene una calificación de regular en dos de los cuatro criterios evaluados en estos casos. Uno de estos criterios es la temperatura de llama, debido a que en las pruebas realizadas es el que a menor temperatura llega.

#### 4.2.3. Matriz de Decisión Económica

En la tabla 17, se consideran los parámetros en cuanto a lo que concierne al criterio económico para la evaluación de los sistemas mencionados anteriormente.

TABLA 17

#### COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE QUEMADORES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS BASADAS EN CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS

Mezcla	Disponibilidad de repuestos	Garantía del proveedor	Costo de Combustible	Disponibilidad de combustible	Costo de Inversión	Costo de Operación	Costos asociados con trabajadores	Uso de elementos auxiliares	Costo asociado a seguridad	Acondicionamiento del combustible	Total
Diesel +aire	2	2	1	3	3	1	2	2	2	2	20
GLP+aire	2	2	3	3	2	3	2	1	2	3	23
Diesel - GLP + aire	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	23
Diesel -aire + O2	2	2	2	3	2	2	2	1	2	2	20
GLP -aire + O2	2	2	3	3	2	3	2	1	2	3	23
Diesel - GLP + aire + O2	2	2	3	3	2	3	2	1	2	2	22

TABLA 18

CALIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS  
ECONÓMICOS

Bajo	Medio	Costoso
3	2	1

De esta tabla se puede hacer las siguientes observaciones:

- Las alternativas que mayores puntajes tuvieron fueron el GLP, con y sin enriquecimiento de O<sub>2</sub>, y el cual, ambos sin enriquecimiento de oxígeno. En el caso del GLP, este es uno de los combustibles más económicos que existen actualmente en el mercado.
- El sistema con quemador dual, tiene la ventaja que utiliza GLP, que es el que hace que el consumo de diesel disminuya significativamente. Además que la adaptación de un quemador a aceite lubricante usado a uno dual tiene un costo de inversión bajo.
- La alternativa que respecta al diesel es la más cara posible tanto para el que utiliza solamente aire y la enriquecida con O<sub>2</sub>. Esto se debe a que el costo del diesel y su consumo es el mayor de todas las alternativas.

#### 4.2.4. Matriz de Decisión de Seguridad

A seguir en la tabla 19, se realiza una evaluación de las alternativas basadas en parámetros de seguridad.

**TABLA 19**

**COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE QUEMADORES UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS, BASADAS EN CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD**

Mezcla	Seguridad de operación	Manejo de combustible	Facilidad de manejo	Seguridad de los empleados	Total
Diesel +aire	3	3	3	3	12
GLP + aire	1	1	3	1	6
Diesel - GLP + aire	3	2	3	2	10
Diesel -aire + O <sub>2</sub>	2	3	2	2	9
GLP -aire + O <sub>2</sub>	1	1	2	1	5
Diesel - GLP + aire + O <sub>2</sub>	2	2	2	1	7

**TABLA 20**

**CALIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SEGURIDAD**

Menor Riesgo	Medio	Riesgoso
3	2	1

De esta tabla se puede concluir lo siguiente:

- La alternativa más segura es el Diesel, la cual en todos los parámetros de evaluación obtuvo el mayor valor. O sea este brinda una operación y manejo seguro.
- En cambio el GLP, debido a su alto índice de explosividad es el que más riesgoso resulta para el personal que está en contacto con éste.
- El enriquecimiento de oxígeno es otro de los factores que aumenta el riesgo.

#### **4.2.5. Matriz de Decisión Ambiental**

En la tabla 21, se evalúa los parámetros correspondientes a los impactos ambientales que se pueden generar.

**TABLA 21**  
**COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE QUEMADORES**  
**UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS**  
**BASADAS EN CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES**

Mezcla	Emisiones	Sustentabilidad de la opción	Impactos ambientales	Consumo de Combustible	Total
Diesel + aire	1	3	1	1	6
GLP + aire	3	3	3	3	12
Diesel - GLP + aire	2	3	2	2	9
Diesel -aire + O <sub>2</sub>	2	3	2	2	9
GLP -aire + O <sub>2</sub>	3	3	3	3	12
Diesel - GLP + aire + O <sub>2</sub>	3	3	3	3	12

**TABLA 22**  
**CALIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES**

Bajo	Medio	Alto
3	2	1

De la matriz de decisión ambiental se observa lo siguiente:

- El GLP es el combustible más limpio de las alternativas, debido a que sus emisiones son las más bajas en lo que respecta a SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Además su consumo de combustible es bajo y el impacto ambiental que genera es el menor.

- En contraste con el GLP, el diesel dentro de las alternativas, sería el combustible que mayor impactos ambientales va a generar, no solamente por sus emisiones, si no por su alto consumo de combustible, el cual sería un impacto al uso de recursos naturales.

#### **4.2.6. Matriz de Decisión Preliminar**

En tabla 23 se hará un compendio de los criterios evaluados anteriormente.

**TABLA 23**  
**RESUMEN DE LOS VALORES CALCULADOS**  
**PARA LAS ALTERNATIVAS DE QUEMADORES**  
**CONTRA LOS CRITERIOS DE DECISIÓN**

<b>Mezcla</b>	<b>Técnico</b>	<b>Seguridad</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Económico</b>	<b>TOTAL</b>
Diesel + aire	18	12	6	20	56
GLP + aire	19	6	12	23	60
Diesel - GLP + aire	23	10	9	23	65
Diesel - aire + O <sub>2</sub>	22	9	9	20	60
GLP - aire + O <sub>2</sub>	21	5	12	23	61
Diesel - GLP + aire + O <sub>2</sub>	24	7	12	22	65

Mediante esta tabla se puede obtener las siguientes observaciones:

- Aunque todavía falta evaluar las alternativas con el factor de ponderación, hasta el momento las más opcionadas son los quemadores duales con y sin enriquecimiento de oxígeno.
- De estos resultados parciales la alternativa con menor puntaje es el Diesel, el cual únicamente en el criterio de decisión de seguridad obtiene el mayor puntaje.

#### 4.2.7. Matriz de Selección Final

Una vez que se calculado los valores parciales de las alternativas, falta evaluarlos con respecto a sus ponderaciones que fueron descritos anteriormente. La siguiente tabla se obtiene multiplicando los valores obtenidos por medio de los criterios de decisión por los criterios de ponderación.



**TABLA 24**  
**EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE QUEMADORES**  
**CONTRA CRITERIOS Y PONDERACIÓN**

Mezcla	Técnico	Seguridad	Ambiental	Económico	TOTAL
Diesel + aire	54	36	18	20	128
GLP + aire	57	18	36	23	134
Diesel - GLP + aire	69	30	27	23	149
Diesel -aire + O <sub>2</sub>	66	27	27	20	140
GLP -aire + O <sub>2</sub>	63	15	36	23	137
Diesel - GLP + aire + O <sub>2</sub>	72	21	36	22	151

De esta tabla se puede concluir lo siguiente:

- La mejor alternativa para la selección de quemadores, es el quemador dual con aire enriquecido con oxígeno, con un puntaje de 151. El factor seguridad fue en el que menor puntaje logró esta alternativa, esto se debe a que utiliza GLP y O<sub>2</sub>, que aumentan el riesgo, pero también mejoran otros factores como son el técnico y el ambiental, donde el sistema dual + aire + O<sub>2</sub> obtuvo las mayores calificaciones.

- El sistema dual + aire, es la siguiente opción, con un valor total de 149. Esta opción es más segura que la que está enriquecido con oxígeno, pero también tiene mayores impactos ambientales.
- El sistema a diesel + aire, fue la alternativa que obtuvo la menor calificación de todos, la que se debe a que únicamente en el factor seguridad obtuvo el mayor puntaje. Entre las alternativas evaluadas, el sistema a Diesel es el que mayor costo posee, mayor impacto ambiental, y en el factor técnico tiene calificaciones entre bueno y óptimo.
- Los sistemas a GLP también obtuvieron valores bajos, esto se debe a que en factores tales como seguridad y técnicos, lograron calificaciones bajas y medias, respectivamente.

#### **4.3. Análisis de Viabilidad Técnica, Social y Económica**

Se ha determinado que con pocas modificaciones en el equipo convencional y en especial en el quemador de tipo de premezcla aire – combustible, se ha podido resolver un problema de alto riesgo para la salud del personal y el ambiente.

Se ha demostrado que el proyecto de cambio de combustible en el equipo artesanal es técnicamente viable, socialmente útil y económicamente alcanzable para todo fundidor, sea este pequeño o mediano.

#### **4.4. Elección de Quemador**

El quemador que se ha elegido es el mismo con las diferentes adecuaciones que aquí se realizaron, pero que por razones obvias, la empresa INTRAMET prefiere no divulgarlas, sin recuperar la inversión realizada.

## **CAPÍTULO 5**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1. El aceite lubricante usado como combustible, no es opción utilizable, debido a que no cumple con la Norma Ambiental Ecuatoriana. En el caso que se quisiera continuar utilizando, el uso de sistemas de control de emisiones son costosas, siempre son un gasto y no provee de valor agregado al producto.
2. En el caso del combustible gaseoso GLP, su consumo es razonable, además de que sus emisiones son las más limpias de todos los combustibles utilizados. El problema de este combustible es que su máxima temperatura de la llama, incluso cuando se lo enriquece con oxígeno, es muy baja para la fusión de los metales ferrosos.
3. El GLP es el combustible ideal para los metales no ferrosos, debido a que su punto de fusión es menor que el de los ferrosos.

4. El mejor sistema para la operación del horno de fusión, es el sistema de combustibles dual, Diesel – GLP enriquecido con oxígeno, debido al incremento de la temperatura de la llama, mejora de eficiencia térmica, disminución del consumo de combustibles y reducción de la concentración de los contaminantes.
  
5. El enriquecimiento de oxígeno en operaciones de combustión industrial aplicables a quemadores y hornos de crisol y basculantes, se hace cada vez más necesaria por las ventajas intrínsecas que conlleva, tal como el incremento en la eficiencia térmica y el aumento de temperatura de la llama, y todo con bajo presupuesto de implantación. El incremento del nivel de oxígeno en el aire de combustión debe ser del 21 al 30 %, debido a que las ventajas que se obtienen son más notables en este rango.
  
6. Para obtener un mejor resultado para alcanzar mayores temperaturas, se recomienda un precalentamiento del horno a base de gas, y posteriormente realizar la inyección de Diesel,

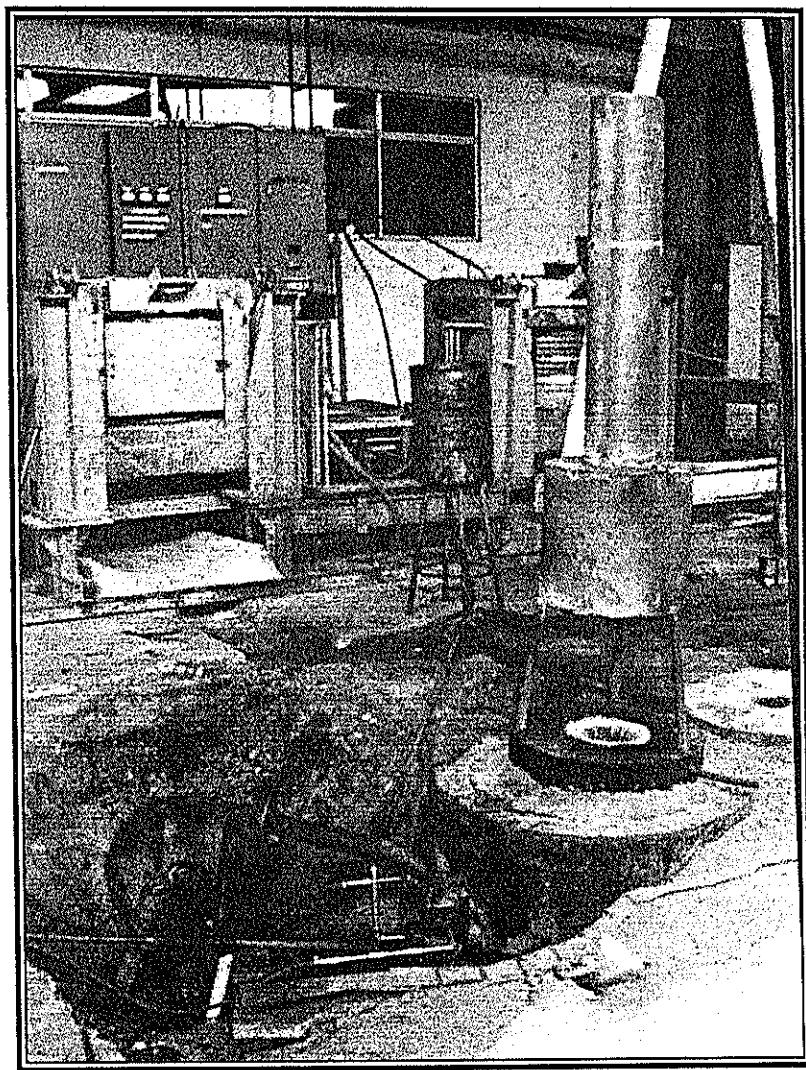


7. Se recomienda respetar las normas de seguridad industrial que aplican a esta operación, elaborando un plan de mantenimiento a las partes críticas del sistema, como son las válvulas del GLP y oxígeno, de igual manera capacitar a todo el personal expuesto, sobre los riesgos de esta operación.
8. Los costos de la inversión y de operación del SISTEMA DUAL DIESEL – GLP, no son significativos para argumentar su no utilización para los fundidores.

## **APÉNDICES:**

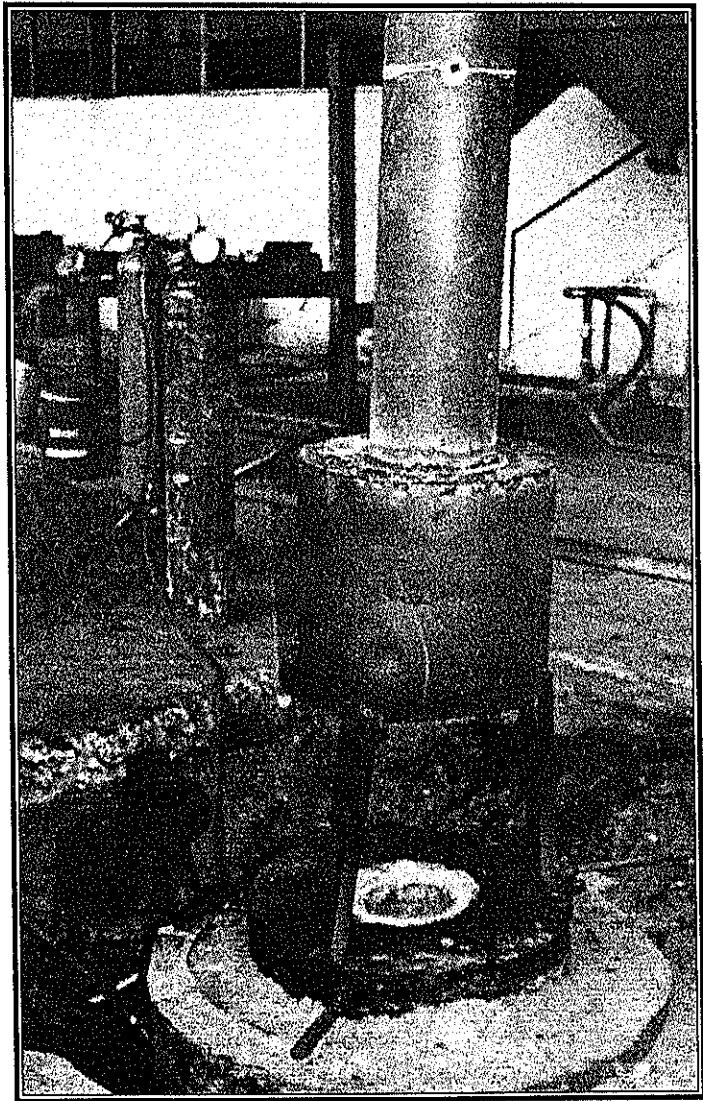
- Apéndice A: Fotografías
- Apéndice B: Reglamentación Ambiental
- Apéndice C: Resultados de Laboratorio
- Apéndice D: Factores de Emisión EPA
- Apéndice E: Equipos Utilizados
- Apéndice F: Cálculos
- Apéndice G: Resultados de Mediciones
- Apéndice H: Plano

## **APÉNDICES A: Fotografías**

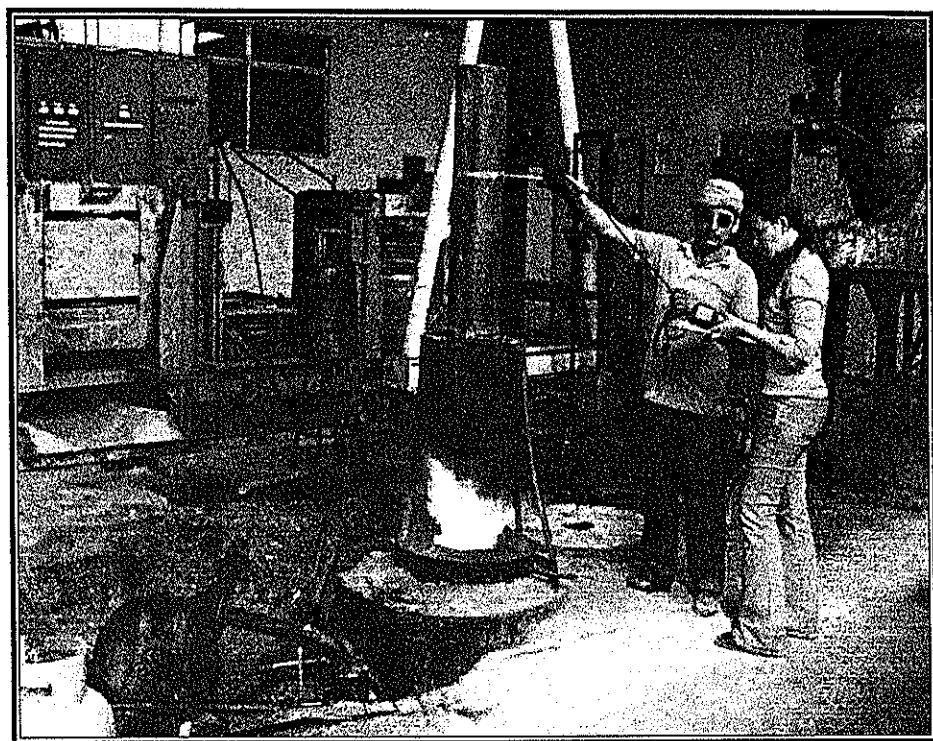


**Fotografía 1:** Se observa los siguientes elementos:

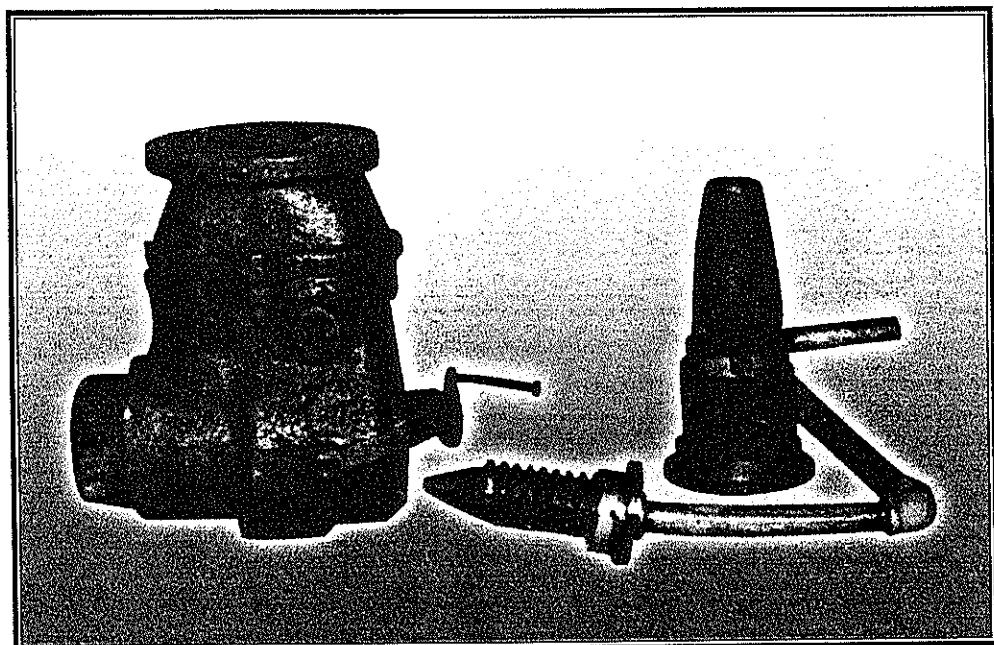
- Horno de crisol fijo
- Chimenea,
- Tanque de combustible,
- Soplador conectado al quemador y,
- Arreglo utilizado para la inyección de oxígeno y para el GLP.



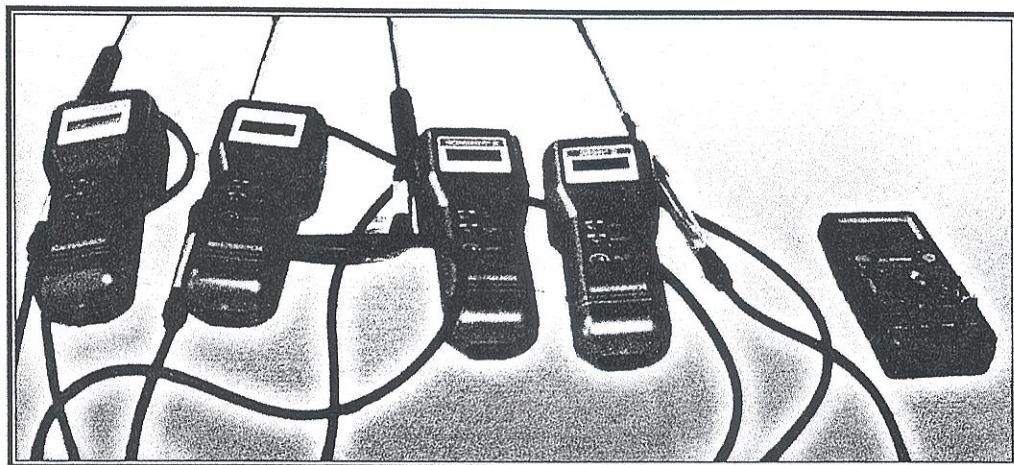
**Fotografía 2:** Se puede ver el tanque de oxígeno, desde donde se inyecta este gas al sistema de combustión.



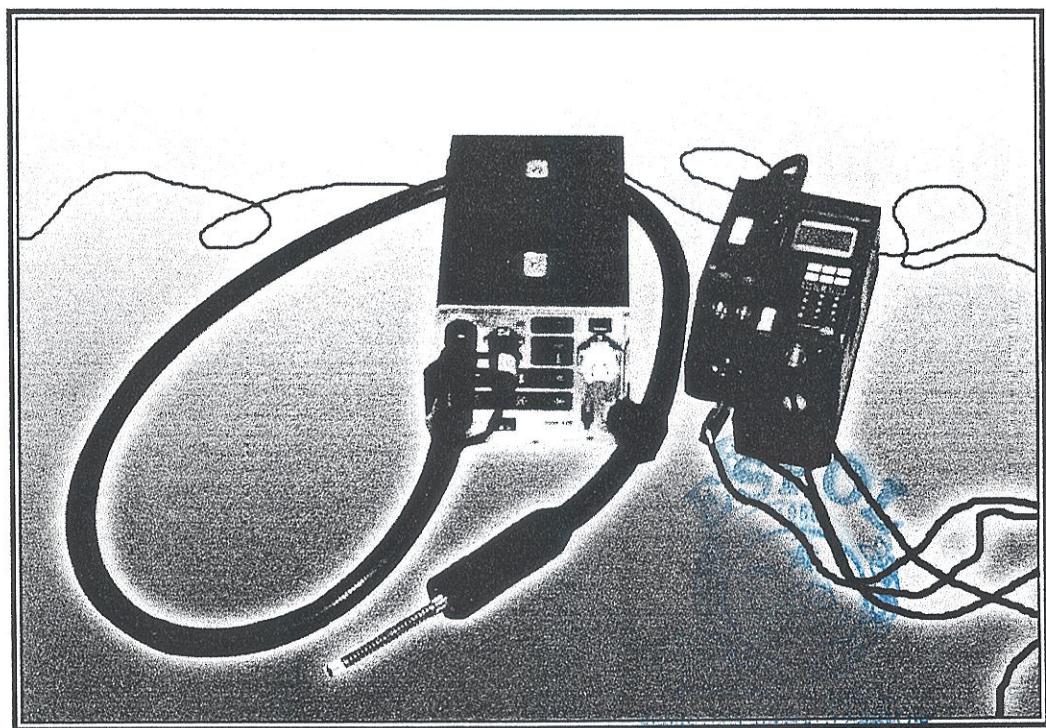
**Fotografía 3:** Se observa mientras se realiza un ensayo de medición de gases, en los puertos de toma de muestra.



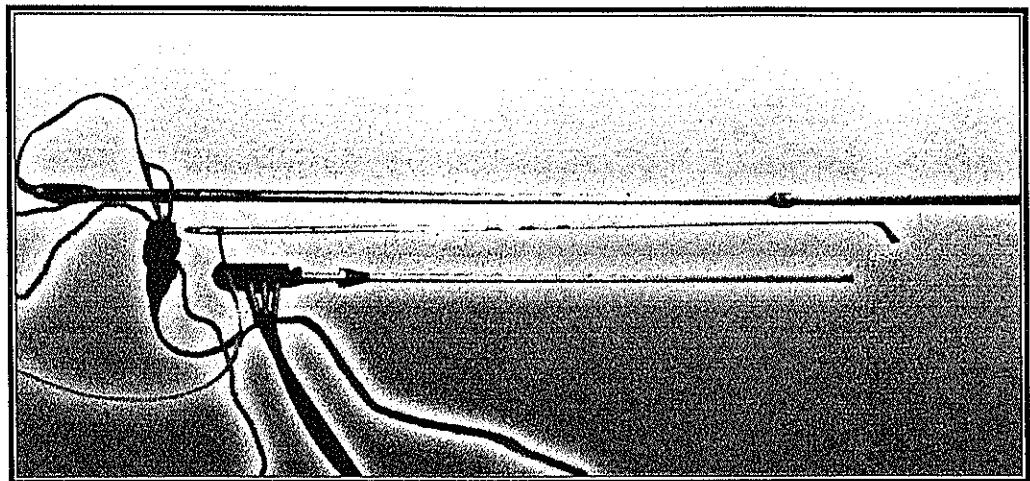
**Fotografía 4:** Vista en detalle del quemador.



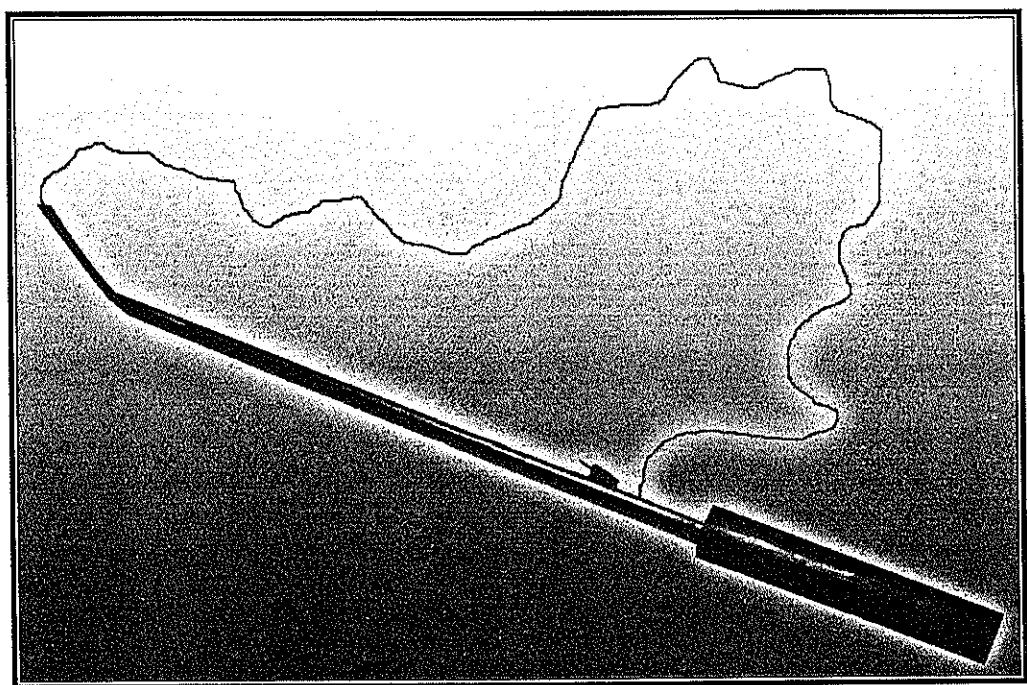
**Fotografía 5:** Vista de los equipos portátiles para medición de gases BACHARACH y de multímetro donde se observan las temperaturas de la termocupla.



**Fotografía 6:** Vista del equipo de medición de gases TESTO junto a la Unidad preparadora de gases y la sección de calentamiento.



**Fotografía 7:** Vista de las sondas de muestreo.



**Fotografía 8:** Se observa la termocupla tipo K para medición de gases, la cual está revestida para protegerse de altas temperaturas.

## **APÉNDICES B: Reglamentación Ambiental**



## PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA

de combustión, esto como parte de los procedimientos normales de permiso de funcionamiento.

### 4.1.2 Valores máximos permisibles de emisión

4.1.2.1 Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión existentes, son los establecidos en la Tabla 1 de esta norma.

**Tabla 1. 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 <sup>[1]</sup>
Partículas Totales	Sólido	355	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	355	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	1 100	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	700	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	500	mg/Nm <sup>3</sup>
Dióxido de Azufre	Sólido	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Líquido <sup>[2]</sup>	1 650	mg/Nm <sup>3</sup>
	Gaseoso	No Aplicable	No Aplicable

Notas:

<sup>[1]</sup> mg/Nm<sup>3</sup>: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, mil trece milibares de presión (1 013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

<sup>[2]</sup> combustibles líquidos comprenden los combustibles fósiles líquidos, tales como diesel, kerosene, búnker C, petróleo crudo, naftas.

4.1.2.2 Los valores de emisión máxima permitida, para fuentes fijas de combustión nuevas, son los establecidos en la Tabla 2 de esta norma.



## PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA

4.1.4.9 El estudio ambiental para una fuente fija nueva, en un área en no cumplimiento con la norma de calidad de aire ambiente, justificará las tecnologías o métodos que implementará la fuente fija a fin de alcanzar la mínima tasa de emisión, y por tanto, no inducir a un incumplimiento con la norma de calidad de aire, o mejorar en términos absolutos la calidad del aire ambiente de la región.

4.1.4.10 Las fuentes fijas nuevas significativas determinarán la altura apropiada de chimenea mediante la aplicación de modelos de dispersión. La altura seleccionada de chimenea deberá considerar el efecto de turbulencia creado por la presencia de edificaciones adyacentes a la chimenea, caracterizándose dicho efecto por la ocurrencia de altas concentraciones de contaminantes emitidos previamente junto a la estructura o edificación.

### 4.1.5 Disposiciones generales

4.1.5.1 Se prohíbe expresamente la dilución de las emisiones al aire desde una fuente fija con el fin de alcanzar cumplimiento con la normativa aquí descrita.

4.1.5.2 Se prohíbe el uso de aceites lubricantes usados como combustible en calderas, hornos u otros equipos de combustión, con excepción de que la fuente fija de combustión demuestre, mediante el respectivo estudio técnico, que cuenta con equipos y procesos de control de emisiones producidas por esta combustión, a fin de no comprometer la calidad del aire al exterior de la fuente, e independientemente de si la fuente fija es significativa o no significativa. Los planos y especificaciones técnicas de la instalación, incluyendo las previsiones de uso de aceites lubricantes usados, sea como combustible principal o como combustible auxiliar, o como combinación de ambos, se sujetarán a las disposiciones de la normativa aplicable para el manejo de desechos peligrosos y de su disposición final. La Entidad Ambiental de Control emitirá el respectivo permiso de operación para las fuentes que utilicen aceites lubricantes usados como combustible, permiso que será renovado cada dos años, previo el respectivo dictamen favorable, considerando los requerimientos estipulados tanto aquí como en la normativa aplicable a desechos peligrosos y su disposición final.

4.1.5.3 Aquellas fuentes fijas que utilicen como combustible otros que no sean combustibles fósiles, serán evaluadas, en primer lugar, en base al criterio de determinar si se trata de fuentes significativas o no. Para una fuente significativa, que utilice combustibles no fósiles, tales como biomasa, se aplicarán los valores máximos de emisión descritos en este reglamento en lo referente a fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos. Para fuentes no significativas, la Entidad Ambiental de

## **APÉNDICES C: Resultados de Laboratorio**



Instituto de Ciencias Químicas-ICQ

Laboratorios de Servicios

Certificado de Análisis

Nº: 051

(RG\_4-1e)

Fecha recepción muestra: Febrero 25 de 2003  
Fecha entrega resultados: Marzo 07 de 2003  
Solicitante: VEPAMIL  
Identificación de muestra: Una muestra de bunker (*ESMERALDAS FO. #2*)

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de Análisis
Gravedad específica 60/60 °F	---	0.9705	ASTM D1298
Densidad API	° API	14.3	ASTM D1298
Punto de inflamación	°C	96	ASTM D92
Agua y Sedimentos	(%)v	0.10	INEN 1490
Cenizas	(%)p	0.12	INEN 1492
Viscosidad a 50 °C (122 °F)	SSF	236.8	INEN 1981
Punto de escorrimiento	°C	+3	ASTM D97
Carbón residual	(%)p	15.5	ASTM D189

  
Ing. Oswaldo Valle S.  
Director ICQ

LCCN:



## ANALYTICAL REPORT

R-2696-03

CUSTOMER : VEPAMIL S.A.  
PRODUCT : FUEL OIL  
SAMPLE WAS TAKING - DATE (\*) : N.A.  
SAMPLE RECEIVED - DATE/ PORT : MARCH 07, 2003/ GUAYAQUIL  
SAMPLE TESTING - DATE : MARCH 08-09, 2003  
VESSEL DELIVERED (\*) : N.A.  
VESSEL RECEIVED (\*) : N.A.  
SAMPLE IDENTIFICATION (\*) : SODERAL - HBX-628

ANALYSIS	UNIT	Especification		METHOD ASTM	RESULTS
		Min	Max		
Sulphur,	% Wt	-----	-----	4294	1,7
Poder Calorífico	BTU / lb	-----	-----	By Calculation	17722

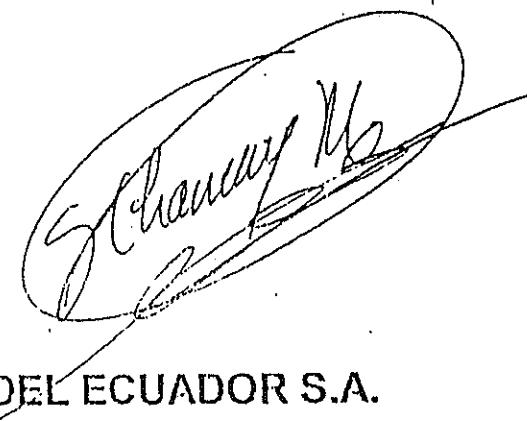
## REMARKS:

(\*) = Information Submitted to us by OCEANBAT

Sample was delivered to SGS Lab

Analysis were carried out in SGS Laboratory at Guayaquil, Ecuador

Issued at Guayaquil March 10, 2003

  
SGS DEL ECUADOR S.A.



Instituto de Ciencias Químicas-ICQ  
Laboratorio de Servicios

Certificado de Análisis  
Nº: 547  
(RG-1-1a)

Fecha recepción muestra: Octubre 17 del 2003  
Fecha entrega resultados: Octubre 24 del 2003  
Solicitante: VEPAMIL S.A.  
Identificación de muestra: En una muestra de Bunker.

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de Análisis	Norma
Densidad API	°API	14.7	Aerómetro	ASTM D 287
Gravedad Específica 60/60 °F	--	0.9718	Arcómetro	ASTM D1293
Punto e Inflamación	°C	106	Combustión en Copia Abierta	IPEN 508
Agua y Sedimentos	(%)v	0.2	Centrifugación	IPEN 1494
Carbón Residual	(%)p	13.2	Conradson	IPEN 1491
Cenizas	(%)p	0.08	Combustión	IPEN 1492
Viscosidad Saybolt 50°C	SSF	238.7	Viscosímetro	IPEN 1494

Observaciones:

Ing. Osvaldo Valle S.  
Director ICQ



LCCZ

**SGS**

## ANALYTICAL REPORT

OGC-00230056

CUSTOMER : VEPAMIL S.A.  
PRODUCT : FUEL OIL  
SAMPLE WAS TAKING - DATE (\*) : N.A.  
SAMPLE RECEIVED - DATE/ PORT : OCTOBER 08, 2003/ GUAYAQUIL  
SAMPLE TESTING - DATE : OCTOBER 13, 2003  
VESSEL DELIVERED (\*) : N.A.  
VESSEL RECEIVED (\*) : N.A.  
SAMPLE IDENTIFICATION (\*) :

ANALYSIS	UNIT	Especification		METHOD ASTM	RESULTS
		Min	Max		
Sulphur,	% Wt	-----	-----	D-4294	1.5
Poder Calorifico	KJ/Kg	-----	-----	D-240	43720
Vanadium	ppm	-----	-----	UOP-391	101

## REMARKS:

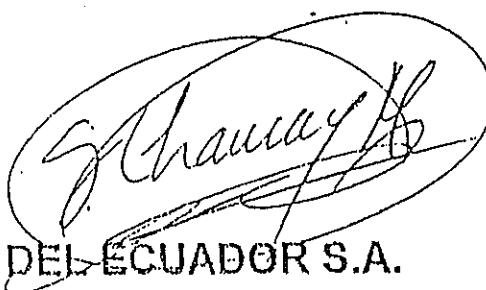
(\*) = Information Submitted to us by OCEANBAT

Sample was delivered to SGS

Sulfur test was carried out in SGS Laboratory at Guayaquil, Ecuador

Heat Calorific and Vanadiemna was carried out in Esmeraldas Refinery, Ecuador

Issued at Guayaquil October 14, 2003

  
SGS DEL ECUADOR S.A.

SGS OGC

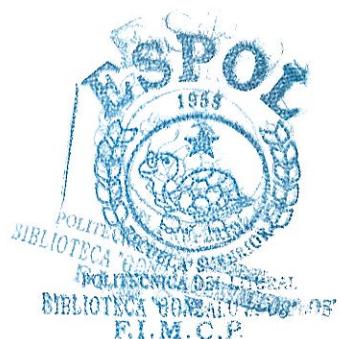
SGS DEL ECUADOR S.A.

## Productos

### Gas Licuado de Petróleo

Requisitos	Propano Comercial	Butano Comercial	Mezcla C3-C4	Método Ensayo ASTM
Presión de Vapor a 1000°F	--	--	--	--
Psig. Máximo	210	70	200	D-1267-84
Residuo Volatil	--	--	--	--
Temperatura al 95% Evaporado	--	--	--	--
Grados F. Máximo	--	--	--	--
Butano y más Pesados	-37	36	36	D-1837-81
Porcentaje Máximo	--	--	--	--
Pentano y más Pesados	2.5	--	--	D-2163-82
Porcentaje Máximo	--	--	--	--
Material Residual	--	2.0	20	D-2163-82
Residuo de Evaporación de 100ml- Máximo	0.05 ml.	--	--	--
Observación Mancha Aceite	pasa	--	--	D-2158-80
Corrosión Lámina de Cobre	Nro 1	Nro 1	Nro 1	D-2158-80
Azufre	--	--	--	--
mg/m <sup>3</sup> Máximo	0.343	0.343	0.343	D-2784-80
Contenido de Humedad	pasa	--	--	D-2713
Contenido de Agua Libre	--	--	--	--
MEZCLA: 70% PROPANO 30% BUTANO				

Fuente: Unidad de Programación de Abastecimiento de Combustibles



## Productos

### Diesel 2

Requisitos	Unidad	Mínimo*	Máximo	Método Ensayo
Punto de inflamación	°C	51	—	INEN 1493
Corrosión lámina de cobre	—	—	Nº 3	INEN 927
Temperatura de destilación 90%	°C	--	370	INEN 926
Agua y sedimentos	% en V	--	0.05	INEN 1434
Índice de cetano calculado		45		INEN 1495
Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo	% en peso	--	0.15	INEN 1491
Cenizas	% en peso	--	0.01	INEN 1492
Viscosidad cinemática 37.8°C	cSt	2.5	6.00	INEN 810
Contenido de azufre	% en peso	--	0.70	INEN 1490
Poder calorífico				

Fuente: Unidad de Programación de Abastecimiento de Combustibles

## APÉNDICES D: Factores de Emisión de EPA



Table 1.3-1. (cont.)

Firing Configuration (SCC) <sup>s</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>b</sup>		SO <sub>3</sub> <sup>c</sup>		NO <sub>x</sub> <sup>d</sup>		CO <sup>e</sup>		Filterable PM <sup>f</sup>	
	Emission Factor (lb/10 <sup>3</sup> gal)	EMISSION FACTOR RATING								
Boilers < 100 Million Btu/hr										
No. 6 oil fired (1-02-004-02/03) (1-03-004-02/03)	157S	A	2S	A	55	A	5	A	10	B
No. 5 oil fired (1-03-004-04)	157S	A	2S	A	55	A	5	A	9.19(S)+3.22	A
No. 4 oil fired (1-03-005-04)	150S	A	2S	A	20	A	5	A	7	B
Distillate oil fired (1-02-005-02/03) (1-03-005-02/03)	142S	A	2S	A	20	A	5	A	2	A
Residential furnace (A2104004/A2104011)	142S	A	2S	A	18	A	5	A	0.4 <sup>g</sup>	B

<sup>b</sup> To convert from lb/10<sup>3</sup> gal to kg/10<sup>3</sup> L, multiply by 0.120. SCC = Source Classification Code.<sup>c</sup> References 1-2,6-9,14,56-60. S indicates that the weight % of sulfur in the oil should be multiplied by the value given. For example, if the fuel is 1% sulfur, then S = 1.<sup>d</sup> References 1-2,6-8,16,57-60. S indicates that the weight % of sulfur in the oil should be multiplied by the value given. For example, if the fuel is 1% sulfur, then S = 1.<sup>e</sup> References 6-7,15,19,22,56-62. Expressed as NO<sub>x</sub>. Test results indicate that at least 95% by weight of NO<sub>x</sub> is NO for all boiler types except residential furnaces, where about 75% is NO. For utility vertical fired boilers use 1.05 lb/10<sup>3</sup> gal at full load and normal (>15%) excess air. Nitrogen oxides emissions from residual oil combustion in industrial and commercial boilers are related to fuel nitrogen content, estimated by the following empirical relationship: lb NO<sub>x</sub>/10<sup>3</sup> gal = 20.54 + 104.39(N), where N is the weight % of nitrogen in the oil. For example, if the fuel is 1% nitrogen, then N = 1.<sup>f</sup> References 6-8,14,17-19,56-61. CO emissions may increase by factors of 10 to 100 if the unit is improperly operated or not well maintained.<sup>g</sup> References 6-8,10,13-15,56-60,62-63. Filterable PM is that particulate collected on or prior to the filter of an EPA Method 5 (or equivalent) sampling train. Particulate emission factors for residual oil combustion are, on average, a function of fuel oil sulfur content where S is the weight % of sulfur in oil. For example, if fuel oil is 1% sulfur, then S = 1.<sup>s</sup> Based on data from new burner designs. Pre-1970's burner designs may emit filterable PM as high as 3.0 lb/10<sup>3</sup> gal.

Table 1.4-1. EMISSION FACTORS FOR NITROGEN OXIDES ( $\text{NO}_x$ ) AND CARBON MONOXIDE (CO) FROM NATURAL GAS COMBUSTION<sup>a</sup>

Combustor Type (MMBtu/hr Heat Input) [SCC]	$\text{NO}_x^b$		CO	
	Emission Factor (lb/ $10^6 \text{ scf}$ )	Emission Factor Rating	Emission Factor (lb/ $10^6 \text{ scf}$ )	Emission Factor Rating
Large Wall-Fired Boilers ( $>100$ ) [1-01-006-01, 1-02-006-01, 1-03-006-01]				
Uncontrolled (Pre-NSPS) <sup>c</sup>	280	A	84	B
Uncontrolled (Post-NSPS) <sup>c</sup>	190	A	84	B
Controlled - Low $\text{NO}_x$ burners	140	A	84	B
Controlled - Flue gas recirculation	100	D	84	B
Small Boilers ( $<100$ ) [1-01-006-02, 1-02-006-02, 1-03-006-02, 1-03-006-03]				
Uncontrolled	100	B	84	B
Controlled - Low $\text{NO}_x$ burners	50	D	84	B
Controlled - Low $\text{NO}_x$ burners/Flue gas recirculation	32	C	84	B
Tangential-Fired Boilers (All Sizes) [1-01-006-04]				
Uncontrolled	170	A	24	C
Controlled - Flue gas recirculation	76	D	98	D
Residential Furnaces ( $<0.3$ ) [No SCC]				
Uncontrolled	94	B	40	B

<sup>a</sup> Reference 11. Units are in pounds of pollutant per million standard cubic feet of natural gas fired. To convert from lb/ $10^6 \text{ scf}$  to kg/ $10^6 \text{ m}^3$ , multiply by 16. Emission factors are based on an average natural gas higher heating value of 1,020 Btu/scf. To convert from lb/ $10^6 \text{ scf}$  to lb/MMBtu, divide by 1,020. The emission factors in this table may be converted to other natural gas heating values by multiplying the given emission factor by the ratio of the specified heating value to this average heating value. SCC = Source Classification Code. ND = no data. NA = not applicable.

<sup>b</sup> Expressed as  $\text{NO}_x$ . For large and small wall fired boilers with SNCR control, apply a 24 percent reduction to the appropriate  $\text{NO}_x$  emission factor. For tangential-fired boilers with SNCR control, apply a 13 percent reduction to the appropriate  $\text{NO}_x$  emission factor.

<sup>c</sup> NSPS = New Source Performance Standard as defined in 40 CFR 60 Subparts D and Db. Post-NSPS units are boilers with greater than 250 MMBtu/hr of heat input that commenced construction modification, or reconstruction after August 17, 1971, and units with heat input capacities between 100 and 250 MMBtu/hr that commenced construction modification, or reconstruction after June 19, 1984.

TABLE 1.4-2. EMISSION FACTORS FOR CRITERIA POLLUTANTS AND GREENHOUSE GASES FROM NATURAL GAS COMBUSTION<sup>a</sup>

Pollutant	Emission Factor (lb/10 <sup>6</sup> scf)	Emission Factor Rating
CO <sub>2</sub> <sup>b</sup>	120,000	A
Lead	0.0005	D
N <sub>2</sub> O (Uncontrolled)	2.2	E
N <sub>2</sub> O (Controlled-low-NO <sub>x</sub> burner)	0.64	E
PM (Total) <sup>c</sup>	7.6	D
PM (Condensable) <sup>c</sup>	5.7	D
PM (Filterable) <sup>c</sup>	1.9	B
SO <sub>2</sub> <sup>d</sup>	0.6	A
TOC	11	B
Methane	2.3	B
VOC	5.5	C

<sup>a</sup> Reference 11. Units are in pounds of pollutant per million standard cubic feet of natural gas fired. Data are for all natural gas combustion sources. To convert from lb/10<sup>6</sup> scf to kg/10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, multiply by 16. To convert from lb/10<sup>6</sup> scf to 1b/MMBtu, divide by 1,020. The emission factors in this table may be converted to other natural gas heating values by multiplying the given emission factor by the ratio of the specified heating value to this average heating value. TOC = Total Organic Compounds.

VOC = Volatile Organic Compounds.

<sup>b</sup> Based on approximately 100% conversion of fuel carbon to CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub>[lb/10<sup>6</sup> scf] = (3.67) (CON) (C)(D), where CON = fractional conversion of fuel carbon to CO<sub>2</sub>, C = carbon content of fuel by weight (0.76), and D = density of fuel, 4.2x10<sup>4</sup> lb/10<sup>6</sup> scf.

<sup>c</sup> All PM (total, condensable, and filterable) is assumed to be less than 1.0 micrometer in diameter. Therefore, the PM emission factors presented here may be used to estimate PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> or PM<sub>1</sub> emissions. Total PM is the sum of the filterable PM and condensable PM. Condensable PM is the particulate matter collected using EPA Method 202 (or equivalent). Filterable PM is the particulate matter collected on, or prior to, the filter of an EPA Method 5 (or equivalent) sampling train.

<sup>d</sup> Based on 100% conversion of fuel sulfur to SO<sub>2</sub>. Assumes sulfur content is natural gas of 2,000 grains/10<sup>6</sup> scf. The SO<sub>2</sub> emission factor in this table can be converted to other natural gas sulfur contents by multiplying the SO<sub>2</sub> emission factor by the ratio of the site-specific sulfur content (grains/10<sup>6</sup> scf) to 2,000 grains/10<sup>6</sup> scf.

## **APÉNDICES E: Equipos Utilizados**

**Equipo Portátil para Medición de Gases de Combustión, Marca TESTO,  
Modelo 350**

Este equipo de medición utilizado consiste de los siguientes accesorios principales:

*Analizador portátil de gases, equipado con celdas electroquímicas y dispositivos electrónicos para medición y almacenamiento de datos. Este equipo reporta concentraciones de los siguientes gases de combustión:*

- Óxidos de Nitrógeno: NO y NO<sub>2</sub>
- Dióxido de Azufre SO<sub>2</sub>
- Monóxido de Carbono CO
- Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>
- Oxígeno O<sub>2</sub>

*La Unidad preparadora de gases, equipada con dispositivos para separación de humedad presente en los gases de combustión. La unidad opera con una sección de manguera calentada eléctricamente y equipada con un filtro para retención de partículas.*

*La Sonda de muestreo está construida en material acero inoxidable, resiste temperaturas de hasta 1 200 °C, y posee longitud total de 2 m.*

*La Sección de calentamiento* consiste de una manguera, calentada eléctricamente, y que transporta la corriente de gases desde la sonda de muestreo hasta la unidad preparadora de gases. El objetivo del calentamiento es prevenir la condensación de humedad, la cual podría interferir en los resultados finales de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> siendo medidos. La sección cuenta con un filtro para retención de partículas de combustión.

En la fotografía # 6 del apéndice A se observa este conjunto de equipos descritos anteriormente.

**Equipos Portátiles para Medición de Oxígeno, O<sub>2</sub>, Oxor®, Nitrógeno, NO<sub>x</sub>, Nonoxor ®, Dióxido de Azufre, SO<sub>2</sub>, Dioxor ®, Monóxido de Carbono, CO, Monoxor® II, Marca BACHARACH**

Estos analizadores de medición de gases tóxicos: monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, y Oxígeno, muestran la presencia del gas en una muestra, llevando ésta a una cámara del sensor por medio de una bomba motorizada. Cada uno de estos equipos portátiles constan de un sensor calibrado, una sonda con filtro.



En el caso de los *analizadores de gases* – CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> - estos pueden detectar concentraciones de 0 a 2 000 ppm, con una exactitud de  $\pm 10$  ppm o  $\pm 5\%$ . El tiempo de respuesta es de menos de 40 segundos.

En cambio en el *analizador de oxígeno*, el rango de medición es entre 0 a 25 %, y la exactitud es de  $\pm 0.8\%$  O<sub>2</sub>. Para este equipo el tiempo de respuesta también es menor de 40 segundos.

*La sonda de muestreo* esta fabricada de acero inoxidable, con un filtro, que esta conectado a una manguera sensible, que permite tomar las muestras de áreas confinadas. Para estos equipos, las sondas pueden ser cambiadas y se pueden utilizar trampas para el condensado.

En la fotografía 5 del apéndice A, se aprecia a estos cuatro equipos con su respectiva sonda de muestreo.

### **Termocupla**

Se utilizó una termocupla tipo K, la cual esta compuesta por Cromel y Alumel, y su rango de medición es de 0 hasta 1 250 °C. Esta termocupla esta revestida de acero inoxidable.

En fotografía # 8 del apéndice A se observa la termocupla utilizada para la medición de la temperatura.

**Cronómetro:**

Se utilizo un cronómetro, un dispositivo para tomar el tiempo, marca ACUTRAK, el cual fue utilizado para obtener el tiempo en llegar a cierta temperatura y para conocer el consumo específico del combustible.



**Messwerte bei  
Auslieferung**  
**Measuring values at  
delivery**

Seite / Page 1

# Kalibrier-Zertifikat

## Calibration Certificate

Zertifikat-Nr.

Bezeichnung Gerät

Geräte-Serien-Nr.

Kunden-Inventar-Nr. Gerät

Bezeichnung Meßwertaufnehmer

Meßwertaufnehmer-Artikel-Nr.

Meßwertaufnehmer-Serien-Nr.

Kunden-Inventar-Nr. Fühler

Auftraggeber

Auftraggeber-Ort

Kunden-Nr.

Auftrags-Nr.

Certificate no.:

Description of instrument:

Instrument type no.:

Customer-inventory-no. instrument:

Description of probe:

Probe model no.:

Probe type no.:

Customer-inventory-no. probe:

Customer:

Customer Place:

Customer's ID no.:

Order no.:

TK 1586n

testo 350

83000029

Ing. José M. Jalil Haas

Quito / Ecuador

1031892

193689

Hiermit bestätigen wir, daß das oben genannte Meßsystem unter Beachtung eines zertifizierten Qualitätssicherungssystems nach DIN ISO 9001 kalibriert wurde.

Die für die Kalibrierung verwendeten Meßeinrichtungen werden regelmäßig kalibriert und sind rückführbar auf die nationalen Normale der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Deutschlands oder auf andere nationale Normale. Wo keine nationalen Normale existieren, entspricht das Meßverfahren der derzeit gültigen technischen Regeln und Normen.

Die für diesen Vorgang angefertigte Dokumentation kann bei Bedarf eingesehen werden.  
Alle erforderlichen Meßdaten sind auf der(n) nachfolgenden Seite(n) dieses Kalibrier-Zertifikats aufgelistet.

We hereby confirm that the above-mentioned measuring system was calibrated according to DIN ISO 9001 , under the observation of a certified quality assurance system.

The measuring installations used for calibration are regularly calibrated and are based on the national standards of the German Federal Physical and Technical Institute (PTB) or on other national standards. Should no national standards exist, the measuring procedure corresponds with the technical regulations and norms valid at the time of the measurement.

The documents established for this procedure are available for viewing.

All the necessary measured data can be found on the following page(s) of this calibration certificate.

### Besondere Bemerkungen / Special remarks

- Meßwerte innerhalb der Spezifikation / Measured values within the range of the specification  
 Meßwerte außerhalb der Spezifikation / Measured values beyond the specification

Kalibrierdatum  
Date of calibration

20.08.03

Bearbeiter (in)  
Person responsible

(I.A. Diana Schreiber)

Laboraufsicht  
Supervisor

(I.A. Johannes Wangler)

Anzahl der Seiten dieses Kalibrier-Zertifikats / No. of pages of calibration certificate

2

# Testo AG

P.O. Box 1140, D-79849 Lenzkirch      Telephone (49)-0 7653-0 681-0  
Testo-Straße 1, D-79853 Lenzkirch      Telefax (49)-0 7653-681100



Kalibrier-Zertifikat Nr. / Calibration certificate no TK1586n

Seite / Page 2

## Meßeinrichtungen / Measuring installations

Bezeichnung <i>Description</i>	Reg.Nr. <i>Reg.no.</i>
Prüfgase / testgas	
1000 ppm CO / 1,4% O2	0535C
400 ppm CO / 5,0% O2	3333A
100 ppm CO	4179C
85 ppm NO	4047B
800 ppm NO	140B
100 ppm NO2	8430B
985 ppm SO2	A5742

## Umgebungsbedingungen / Ambient conditions

Temperatur / Temperature	23°C	± 3°C
Feuchte / Humidity	50%rF	± 10%rF
Druck / Pressure	925hPa	± 10hPa

## Meßverfahren / Measuring procedure

Vergleichsmessung mit Prüfgasen  
*Comparision measurement with testgas*

## Meßergebnisse / Measuring results

Meßunsicherheit des Sollwertes <i>Uncertainty of reference value</i>	± 3%
	± 3%

	Sollwert <i>Nominal value</i>	Istwert Prüfling <i>Actual value of tested instr.</i>	Abweichung <i>Deviation</i>
O2 in Vol.-%	1,4	1,4	0,0
O2 in Vol.-%	5,0	5,0	0,0
CO in ppm	98	102	4
CO in ppm	992	1016	24
CO in ppm	401	399	-2
NO in ppm	85	83	-2
NO in ppm	807	799	-8
NO2 in ppm	104	103	-1
SO2 in ppm	985	977	-8

Testo AG

P.O. Box 1140, D-79849 Lenzkirch Telephone (49) 07653 681-0  
 Testo-Straße 1, D-79853 Lenzkirch Telefax (49) 07653 681100

## **APÉNDICES F: Cálculos**

## **CÁLCULOS EFECTUADOS CON LAS MEDICIONES**

### **Introducción**

De acuerdo a lo descrito en el Capítulo 4 de esta Tesis, fue necesario efectuar cálculos de conversión de unidades de emisión. Esto se debe a que, para comparar el resultado de emisión del horno con la Regulación Ambiental Local, es necesario convertir las unidades reportadas experimentalmente con las unidades establecidas en la regulación.

En este último caso, se utilizan miligramos de gases por metro cúbico de aire a condiciones normales ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ). En cambio, el método experimental determinó la emisión de gases en unidades de partes por millón (ppm). Además los resultados fueron corregidos a las condiciones de referencia de 7% de Oxígeno, requerido por la Regulación.

A continuación se presentan los datos utilizados en la conversión de unidades.

## Datos Utilizados

Se utilizó la siguiente información:

- Peso Molecular del SO<sub>2</sub>: 64
- Peso Molecular del NO<sub>x</sub>: 46
- Peso Molecular del CO: 28
- Concentración en ppm de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO

Estos valores fueron utilizados para determinar la concentración en masa de cada una de las emisiones desde la Unidad a Vapor. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_{mass} = \frac{44,64 \times C_{ppm} \times Mw}{1000} \quad (1)$$

Donde:

C<sub>mass</sub>: Concentración en masa, mg/m<sup>3</sup>

C<sub>ppm</sub>: Concentración en volumen, ppm

Mw: Peso molecular del gas

Adicionalmente para corregir los valores reportados en la medición se utilizó la siguiente ecuación (2):

$$C_{ppm\text{-corregido}} = C_{ppm} \times \left( \frac{13,9}{20,9 - O_2} \right) \quad (2)$$

Donde:

$C_{ppm\text{-corregido}}$ : Concentración corregida al 7% de oxígeno

$O_2$ : Porcentaje de oxígeno reportado durante la medición

A continuación se presentan ejemplos del uso de las fórmulas anteriormente expuestas.

#### Cálculo de $C_{ppm\text{-corregido}}$

Los datos obtenidos en medición para el aceite + aire son los siguientes:

PUERTO DE MEDICIÓN	O <sub>2</sub> %	ppm SO <sub>2</sub>
UNO	15,55	91,5

Primero se debe corregir el oxígeno, para esto se aplica la ecuación (2)

$$C_{ppm\text{-corregido}} = 91,5 \times \left( \frac{13,9}{20,9 - 15,55} \right)$$

$$C_{ppm\text{-corregido}} = \frac{1271,9}{5,35}$$

$$C_{ppm\text{-corregido}} = 237,7$$

### Cálculo de C<sub>mass</sub>

Una vez que se ha corregido el O<sub>2</sub> al 7%, se debe tener el promedio de estas concentraciones corregidas para X contaminante, en el caso del ejemplo para SO<sub>2</sub>.

PUERTO DE MEDICIÓN	C <sub>ppm-corregidos SO<sub>2</sub></sub>	Peso molecular de SO <sub>2</sub>
UNO	209,1	
DOS	245,6	
Promedio	227,4	64

Se emplea la fórmula (1)

$$C_{mass} = \frac{44,64 \times 227,4 \times 64}{1000}$$

$$C_{mass} = \frac{649\,672}{1000}$$

$$C_{mass} = 649,7$$

$$C_{mass} \equiv 650$$

## **APÉNDICES G: Resultados de Mediciones**

**Aceite + Aire**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	74,8	375,8	18,8	52,0	0,5	52,5	52,5	343,4	343,4	489
muestra dos	77,0	375,8	14,5	53,1	0,4	53,5	76,5	115,3	164,9	165,9
Promedio	75,9	375,8	16,6	52,6	0,5	53,0	64,5	170,4	209,1	246
Puerto Dos	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2			
muestra uno	46,0	425,0	16,5	55,5	0,3	55,8	80,8	176,1	255,1	145,3
muestra dos	109,5	425,0	15,6	50,5	0,0	50,5	91,5	131,2	237,7	284,5
Promedio	77,8	425,0	16,0	53,0	0,2	53,1	86,1	151,5	245,6	221,7
Torno T llama	962,0 1212,0									
CONDICIONES:				UNIDADES				NOx	SO2	CO
EMISION FINAL				ppm				161,0	227,4	233,9
@7% O2 y Temp Non				mg/m^3				331,0	650,0	292,0

**Aceite - GLP + Aire**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	21,5	440,0	13,1	25,0	0,3	25,3	56,3	45,3	100,8	38,5
muestra dos	182,0	471,0	15,5	57,4	0,6	58,0	76,5	148,6	196	466,3
Promedio	101,8	455,5	14,3	41,2	0,5	41,7	66,4	86,9	140	214,4
Puerto Dos	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2			
muestra uno	50,5	484,5	12,3	23,8	0,2	24,0	21,5	38,6	34,5	81,2
muestra dos	148,5	480,0	14,8	61,8	1,0	62,8	121,5	142,4	275,7	337
Promedio	99,5	482,3	13,5	42,8	0,6	43,4	71,5	81,6	134,5	187,2

EMISIÓN FINAL @7% O2 y Temp Non	UNIDADES ppm	NOx	SO2	CO
	mg/m^3	84,3	137,3	200,8
		173,0	392,0	251,0

Thorno	12000	UNIDADES	NOx
Tierra	14500	ppm	84,3
		mg/m^3	137,3
			200,8

CONDICIONES

Fecha: 12-dic-03  
Ambient Air Temp.: 32,0

**Aceite + Aire con O<sub>2</sub> al 30%**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO				ppm NO <sub>2</sub>				ppm NOx				ppm SO <sub>2</sub>				Corrección O <sub>2</sub>			
				NOx	SO <sub>2</sub>	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO					
muestra uno	174	487,40	13	67,60	0,4	68	76			119,6	133,7		306,2										
muestra dos	173	485,60	12,8	69,50	0,5	70	77			120,1	132,1		296,9										
Promedio	173,5	486,5	12,9	68,6	0,5	69,0	76,5			119,9	132,9		301,5										
Puerto Dos	ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>																
muestra uno	128	480,20	13,4	63,80	0,2	64	100			118,6	185,3		237,2										
muestra dos	128	475,40	13,5	62,70	0,3	63	99			118,3	186		240,4										
Promedio	128,0	477,8	13,5	63,3	0,3	63,5	99,5			118,5	185,6		238,8										



Horno  
T llama  
1256,0  
1506,0

EMISIÓN FINAL			UNIDADES		
ppm	mg/m <sup>3</sup>	Nor	ppm	mg/m <sup>3</sup>	Nor
@7% O <sub>2</sub> y Temp Nor			NOx	SO <sub>2</sub>	CO
			119,2	159,3	270,2
			245,0	455,0	338,0

CONDICIONES:

Fecha: 05 dic 03  
Ambient Air Temp: 31,0

**DIESEL + AIRE**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>		
								NOx	SO <sub>2</sub>	CO
muestra uno	158,3	441,8	14,9	44,5	0,5	45,0	50,0	104,2	126,2	366,5
muestra dos	184,2	443,2	14,7	38,5	0,2	38,7	54,5	87,2	112,8	415,5
Promedio	171,3	442,5	14,8	41,5	0,3	41,8	52,3	94,8	119,4	391,3
Puerto Dos	ppm CO	°C FTT	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>			
muestra uno	114,5	448,9	16,0	44,5	0,6	45,1	67,5	128	156	324,8
muestra dos	117,5	450,3	15,2	48,5	1,0	49,5	55,0	120,7	164,6	286,5
Promedio	116,0	449,6	15,6	46,5	0,8	47,3	61,3	124,1	160,6	304,2
T hornos T llama	986,0 1236,0									

EMISIÓN FINAL @ 7% O <sub>2</sub> y Temp Norm:	UNIDADES	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
15-dic-03 33,00	ppm mg/m <sup>3</sup>	109,5 225,0	140,0 400,0	347,8 435,0

CONDICIONES:
Fecha:
Ambient Air Temp.:

**Diesel + aire con O<sub>2</sub> - 25%**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO			ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>	
				ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx				NOx	SO <sub>2</sub>
muestra uno	113,8	465,4	12,6	44,5	0,5	45,0	53,0			75,7	89,1
muestra dos	153,5	470,3	13,1	38,5	1,0	39,5	55,4			70,1	98,3
Promedio	133,6	467,9	12,8	41,5	0,8	42,3	54,2			72,9	93,6
Puerto Dos	ppm CO	°C FT	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>		
muestra uno	74,0	462,4	12,2	50,5	0,0	50,5	62,0			80,7	99,1
muestra dos	110,5	465,3	16,2	48,0	0,0	48,0	67,0			142,8	199,4
Promedio	92,3	463,9	14,2	49,3	0,0	49,3	64,5			102,4	134,1
T hornio	1068,0										
T llama	1318,0										

EMISIÓN FINAL @ 7% O <sub>2</sub> y Temp Norm	UNIDADES ppm mg/m <sup>3</sup>	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
		87,7	113,9	211,3
		180,0	325,0	264,0

CONDICIONES:	EMISIÓN FINAL @ 7% O <sub>2</sub> y Temp Norm	UNIDADES ppm mg/m <sup>3</sup>	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
Fecha: Ambient Air Temp.::	15-dic-03 33,00				

**Diesel + aire con O<sub>2</sub> 30%**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>		
								NOx	SO <sub>2</sub>	CO
muestra uno	75,3	475,4	15,3	28,5	0,3	28,8	36,3	71,1	89,7	186,2
muestra dos	60,5	469,8	16,3	32,5	0,5	33,0	35,0	99	105	181,5
Promedio	67,9	472,6	15,8	30,5	0,4	30,9	35,6	83,7	96,6	184,1
Puerto Dos	ppm CO	°C FT	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>			
muestra uno	90,0	483,0	14,3	37,5	0,0	37,5	42,5	79	89,5	189,5
muestra dos	76,0	473,5	15,2	35,5	0,0	35,5	51,0	85,9	123,4	183,9
Promedio	83,0	478,2	14,7	36,5	0,0	36,5	46,8	82,2	105,3	186,9
T hornos	1118,00									
T llama	1368,00									
<b>CONDICIONES:</b>										
Fecha:	15-dic-03									
Ambient Air Temp.:	33,00									
EMISION FINAL	UNIDADES							NOx	SO <sub>2</sub>	CO
@7% O <sub>2</sub> y Temp Norm.	ppm							83,0	101,0	185,5
	mg/m <sup>3</sup>							170,0	288,0	232,0

GLP - AIRE

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOX	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	433,5	275,0	15,2	16,5	1,0	24,0	0,0	58,1	0	1049,5
muestra dos	510,5	284,0	15,3	13,0	2,5	18,0	0,0	44,8	0	1271,2
Promedio	472,0	279,5	15,2	14,8	1,8	21,0	0,0	51,6	0	1158,8

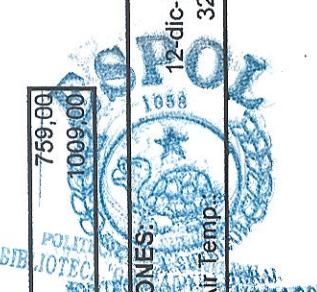
  

Puerto Dos	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOX	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	616,0	267,5	14,8	13,3	0,7	19,0	0,0	43,4	0	1407,9
muestra dos	566,8	272,0	15,3	13,3	2,3	21,0	0,0	52,3	0	1410,6
Promedio	591,4	269,8	15,1	13,3	1,5	20,0	0,0	47,7	0	1409,2

CONDICIONES:	EMISION FINAL	UNIDADES	CORRECCIONES		
			ppm	mg/m³	CO
Fecha:	12-dic-03		49,7	0,0	1284,0
@7% O2 y Temp Non Ambient Air	32,0		102,0	0,0	1605,0

CONDICIONES:  
Fecha: 12-dic-03  
@7% O2 y Temp Non Ambient Air  
Temp: 32,0

T horro 759,00  
T llama 1009,00



GIP + aire con O<sub>2</sub> 25%

Puerto Uno	ppm	CO	°C	stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO						ppm NO <sub>2</sub>			ppm NOx			ppm SO <sub>2</sub>			Corrección O <sub>2</sub>	
						NO	NO <sub>2</sub>	ppm	NO	NO <sub>2</sub>	ppm	NOx	ppm	SO <sub>2</sub>	ppm	NOx	ppm	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO	
muestra uno	148,0	325,0	15,9		12,0	0,8	12,5	0,0								34,8	0	411,4				
muestra dos	145,0	329,4	17,6		10,0	1,0	11,0	0,0								46,3	0	610,8				
Promedio	146,5	327,2	16,8		11,0	0,9	11,8	0,0								39,4	0	490,7				
Puerto Dos	ppm	CO	°C	stack	% O <sub>2</sub>	ppm	NO	ppm	NO <sub>2</sub>	ppm	NOx	ppm	SO <sub>2</sub>	ppm	NOx	ppm	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	CO		
muestra uno	201,5	321,1	17,9		10,0	1,5	11,0	0,0								51	0	933,6				
muestra dos	250,0	339,3	17,7		8,5	2,5	11,0	0,0								47	0	1069,2				
Promedio	225,8	330,2	17,8		9,3	2,0	11,0	0,0								48,9	0	1004,1				
T <sub>Thorno</sub>	852,00																					
T <sub>Llama</sub>	1102,00																					

CONDICIONES:	UNIDADES			EMISIÓN FINAL @7% O <sub>2</sub> y Temp Non	ppm	mg/m <sup>3</sup>	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
	Fecha:	Ambient Air Temp.:	33,0						
				15-dic-03	44,2	0,0	747,4	91,0	934,0

**GLP + aire con O<sub>2</sub> 30%**

	ppm	CO	°C	stack	% O <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>						
						NO	ppm	NO <sub>2</sub>	ppm	NOx	ppm	SO <sub>2</sub>
Puerto Uno	279,0		353,7	15,4	16,0	2,5	15,0	0,0		37,9	0	705,1
muestra uno												
muestra dos	283,0		346,1	15,2	32,5	3,0	14,0	0,0		34,1	0	690,1
Promedio	281,0		349,9	15,3	24,3	2,8	14,5	0,0		36	0	697,5
Puerto Dos	283,0		354,3	14,9	21,5	2,5	17,0	0,0		39,4	0	655,6
muestra uno												
muestra dos	279,0		353,7	14,3	16,0	2,5	18,5	0,0		39	0	587,6
Promedio	281,0		354,0	14,6	18,8	2,5	17,8	0,0		39,2	0	620

	EMISIÓN FINAL @7% O <sub>2</sub> y Temp Non 33,0	UNIDADES		
		NOx ppm	SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	CO ppm
Horno Tierra	967,00 1217,00	37,6 77,0	0,0 0,0	658,8 823,0

<b>CONDICIONES:</b>
Fecha:
Ambient Air Temp:
15-dic-03 33,0

**DIESEL - GLP + AIRE**

Puerto Uno	ppm CO	°C stack	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	208,3	464,8	14,9	26,8	0,5	27,3	27,0	63,3	62,5	482,3
muestra dos	234,5	465,3	14,7	33,2	0,2	33,3	30,0	75,2	67,7	528,9
Promedio	221,4	465,1	14,8	30,0	0,3	30,3	28,5	68,5	65,1	505,9

Puerto Dos	ppm CO	°C FT	% O2	ppm NO	ppm NO2	ppm NOx	ppm SO2	Corrección O2		
								NOx	SO2	CO
muestra uno	64,5	470,5	16,0	44,5	0,6	45,1	54,5	128	154,6	183
muestra dos	67,5	450,3	15,2	48,5	1,0	49,5	67,5	120,7	164,6	164,6
Promedio	66,0	460,4	15,6	46,5	0,8	47,3	61,0	124,1	160	173,1

Thorno	1121,0
T llama	1371,0

CONDICIONES:	EMISION FINAL	UNIDADES
Fecha: Ambient Air Temp.:	03-dic-03 30,0	ppm mg/m^3

CONDICIONES:	EMISION FINAL	UNIDADES
@7% O2 y Temp Non	96,3 198,0	ppm mg/m^3

CONDICIONES:	EMISION FINAL	UNIDADES
@7% O2 y Temp Non	96,3 198,0	ppm mg/m^3

**Diesel - GIP + Aire con O<sub>2</sub> - 25%**

Puerto Uno		ppm CO	°C stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NO <sub>x</sub>	ppm SO <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>		
									NOx	SO <sub>2</sub>	CO
muestra uno	77,0	490,2	14,4	33,5	0,5	37,0	28,0		78,7	59,6	163,8
muestra dos	41,0	493,5	14,0	30,0	0,0	39,0	29,0		78,6	58,4	82,6
Promedio	59,0	491,9	14,2	36,3	0,3	38,0	28,5		78,6	59	122,1
Puerto Dos		ppm CO	°C FT	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NO <sub>x</sub>	ppm SO <sub>2</sub>			
muestra uno	26,0	494,5	16,2	25,0	0,0	35,0	26,5		103,1	78,1	76,6
muestra dos	34,0	497,8	13,3	37,0	0,0	37,0	26,0		47,6	47,6	62,2
Promedio	30,0	496,2	14,7	31,0	0,0	36,0	26,3		81,2	59,2	67,7
T hornos	1192,00										
T llama	1442,00										

EMISIÓN FINAL @7% O <sub>2</sub> y Temp Non Ambient Air Temp.:	UNIDADES ppm mg/m <sup>3</sup>	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
15-dic-03 33,0	79,9 164,0	59,1 169,0	94,9 119,0	

CONDICIONES:	UNIDADES
Fecha: Ambient Air Temp.:	ppm mg/m <sup>3</sup>

Diesel - GLP + Aire con O<sub>2</sub> - 30%

Puerto Uno	ppm	CO	°C	stack	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>	Corrección O <sub>2</sub>		
										NOx	SO <sub>2</sub>	CO
muestra uno	18,5	520,4	14,8	45,5	0,0	27,0	20,0			61,6	45,6	42,2
muestra dos	19,5	525,8	16,1	34,5	0,0	30,0	22,0			87,4	64,1	56,8
Promedio	19,0	523,1	15,5	40,0	0,0	28,5	21,0			73	53,8	48,6
Puerto Dos	ppm	CO	°C	FT	% O <sub>2</sub>	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	ppm NOx	ppm SO <sub>2</sub>			
muestra uno	17,5	527,4	15,1	43,0	0,0	30,0	21,4			71,9	51,3	42
muestra dos	18,5	523,7	16,4	32,0	0,0	26,5	23,2			82,3	72,1	57,5
Promedio	18,0	525,6	15,8	37,5	0,0	28,3	22,3			76,5	60,4	48,7

EMISIÓN FINAL	UNIDADES	NOx	SO <sub>2</sub>	CO
@7% O <sub>2</sub> y Temp Non	ppm mg/m <sup>3</sup>	74,8	57,1	48,7
		153,0	163,0	61,0

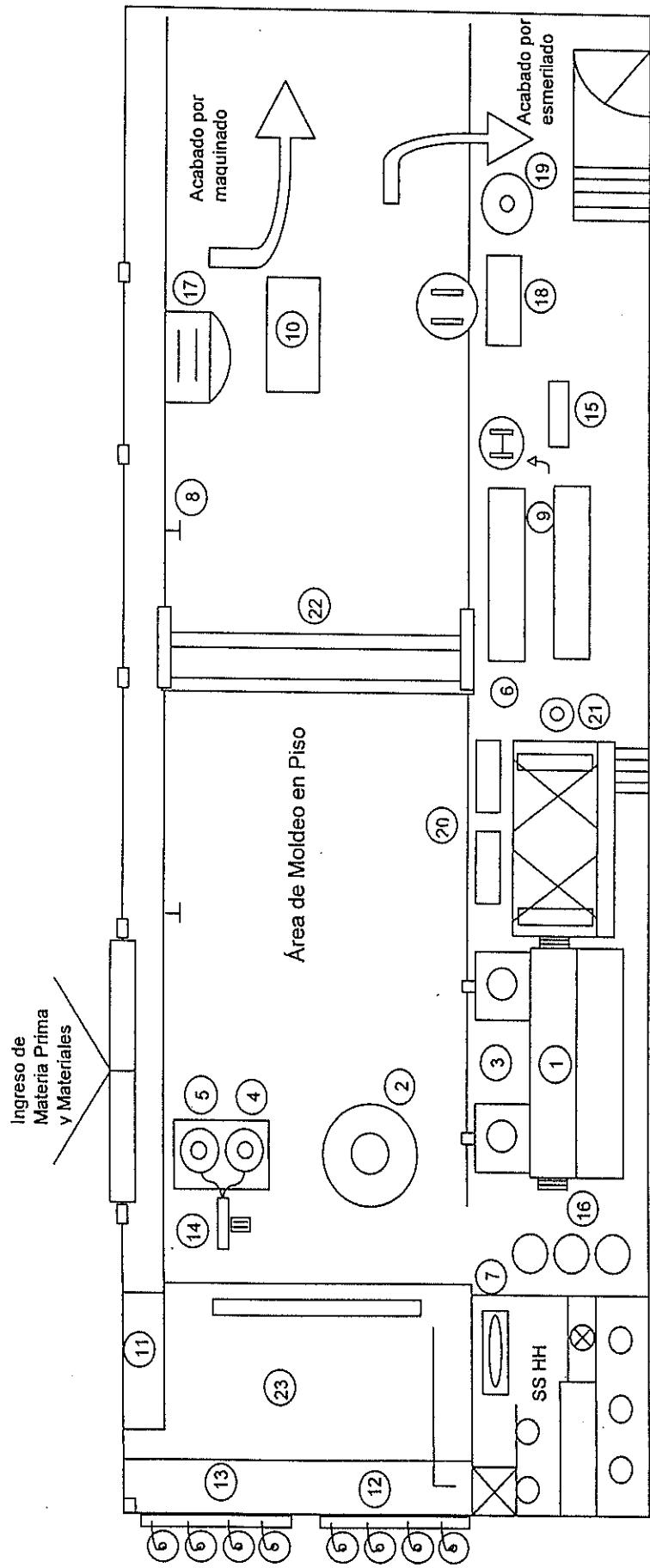
  

CONDICIONES:			
Fecha:	15-dic-03		
Ambient Air Temp.:	33,0		



T horro  
T Tafamá  
282,0  
1534,0

## **APÉNDICES H: Plano**



FIMCP - ESPOL		
PROYECTO:	TESIS DE GRADO	PLANO No.
Clave	ESCALA	CONTENIE:
Obra		FECHA
Revisión		NOMBRE
		B. Jiménez I. Weiser
		1

## BIBLIOGRAFÍA

1. LAWRENCE E. DOYLE, CARL A. KEYSE, JAMESL. LEACH,  
GEORGE F. SCHRADE, MORSE B. SINGER, Procesos y Materiales  
de Manufactura para Ingenieros, Prentice-Hall; 1998.
  
2. CAPELLO EDUARDO, Tecnología de la Fundición, Editorial Gustavo  
Gili, S.A., España, 1982.
  
3. DE NEVERS NOEL, Ingeniería de Control de la Contaminación del  
Aire, McGraw-Hill, U.S.A., 1997



4. OLADE - BID, Guía Para la Evaluación de Impacto Ambiental de Centrales Termoeléctricas, Mayo 1994
5. TEXTO UNIFICADO DE LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL SECUNDARIA, Ecuador, Corporación de Estudios y Publicaciones, Actualizada a Diciembre de 2002.
6. U.S. EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 5th. Edition, AP-42; Washington D.C., U.S.A. , 1995
7. WORLD BANK, Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998, Environment Department; Washington D.C., U.S.A., 1999.
8. El Manual Gestión de la Calidad Ambiental,  
[http://www.science.oas.org/OEA\\_GTZ/LIBROS/Ambiental/ambiental.htm](http://www.science.oas.org/OEA_GTZ/LIBROS/Ambiental/ambiental.htm)
9. CNTL / SENAI - RS / UNIDO / UNEP, Presentación de Costos Ambientales en Producción más Limpia, Programa de Capacitación en para Especialistas en Producción más Limpia, 2003.

10. ONUDI – PNUMA – CANACINTRA – USAID, Producción más Limpia en el Sector de Fundición, México, Primera Edición, 1998.
11. COOPER, DAVID, Y F. C. ALLEY, Air Pollution Control - A Design Approach -, Waveland Press Inc, Illinois – U.S.A., 2nd edition 1994.
12. INE – CCE, Sistema de Calderos, Programa de Capacitación en Gerencia de la Energía en la Industria, Ecuador, 1992
13. GILCHRIST J. D., Fuels, Furnaces and Refractories, Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies; Ohio – U.S.A., 1977, Vol. 21
14. THE MCGRAW-HILL MAGAZINE OF ENERGY SYSTEM ENGINEERING, Power Generation System, Editorial McGraw-Hill, U.S.A., 1967.
15. SOLBERG HARRY, CROMER ORVILLE, SPALDING ALBERT, Thermal Engineering, Wiley John & Sons, Inc.; U.S.A. 1960.

16. SCHUHMAN JR REINHARDT, Metallurgical Engineering, Engineering Principles, Addison- Wesley Publishing Company, Inc; U.S.A. 1952, Vol. 1
  
  
  
17. VELEZ JORGE "Incremento de la Eficiencia Térmica de un horno de Calentamiento a través del Enriquecimiento de la Mezcla con Oxígeno" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1989)
  
  
  
18. ROBBINS STEPHEN, COULTER MARY, Administración, Prentice Hall Inc.; Sexta Edición, 2000