

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



**“OPERACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE
HORNOS DE REFINERÍAS DE PETROLEO”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERA QUÍMICA

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

MARIA MERCEDES CARDENAS PEÑA

LIMA – PERÚ

2013

Este informe está dedicado con mucho amor a mi esposo Juan, a mis queridos padres y a mi excelente hermano, gracias por todo el apoyo y la comprensión que me han brindado. Gracias por compartir conmigo tantas etapas de mi vida, los amo. Y sobre todo gracias Dios mío por permitir que todo esto suceda.

INDICE

I.- INTRODUCCIÓN	3
II.- MARCO TEÓRICO	4
2.1.- LA COMBUSTIÓN	4
2.2.- LOS HORNOS EN LAS REFINERÍAS DE PETRÓLEO.....	6
2.2.1.- Unidades de Proceso en una Refinería y la Participación de los Hornos en cada una de ellas.....	8
2.3.- PARTES DE UN HORNO DE REFINERÍA.....	16
2.3.1.-Diagrama del equipo identificando sus partes.....	16
2.3.2.- Quemadores.....	17
2.3.3.- Tubos de la Zona Convectiva y Radiante.....	19
2.3.4.- Sopladores de Hollín	20
2.3.5.- Válvula que admite el ingreso de gases de combustión a la Chimenea.....	22
2.4.- PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN HORNO DENTRO DE LOS COSTOS VARIABLES DE LA REFINERÍA	23
III.- OPERACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE HORNOS DE REFINERÍAS DE PETRÓLEO.....	25
3.1.- PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS HORNOS DE PROCESO EN LAS REFINERÍAS DE PETRÓLEO.....	25
3.2.- CONTROLES PARA UN BUEN DESEMPEÑO OPERATIVO.....	35
3.2.1.- Monitorear Flujo de Masa por Área de Superficie Transversal de Tubos.....	35
3.2.2.- Monitorear Temperatura de Metal de Piel de Tubos (Skin Points).	37
3.2.3.- Monitorear Tiro en Techo de Zona de Radiación y Exceso de Oxígeno en la Combustión.....	40
3.2.4.- Monitorear el Ensuciamiento de la Zona Convectiva.....	46
3.2.5.- Monitorear estado de quemadores.....	48

3.3.- INDICADOR DE EFICIENCIA, AHORRO ECONÓMICO Y REDUCCIÓN DE EMISIONES DE UN HORNO DE REFINERÍA	51
3.4.- CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UN HORNO:	60
IV.- CON CLUSIONES	65
V.- RECOMENDACIONES	68
VI.- BIBLIOGRAFIA.....	71

I.- INTRODUCCIÓN

El énfasis de las refinerías de petróleo por ser eficientes energéticamente y minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, las ha direccionado a impulsar acciones para optimizar todos sus procesos. La implementación de dichas acciones les permitirá obtener ahorros significativos de energía y dinero en el corto y largo plazo, ya que desencadenarán en un menor impacto ambiental, un adecuado consumo de energía y un incremento de la competitividad.

En la actualidad, el consumo de combustible quemado en los Hornos de Proceso, representa una gran proporción de los costos variables de las Refinerías de Petróleo.

El presente informe enfatiza en los controles operativos claves que deben implementarse y monitorearse en las Refinerías de Petróleo para que los hornos trabajen eficientemente logrando alcanzar sus condiciones de diseño y de esta manera contribuir en ahorros para la Refinería y en un menor impacto ambiental, ya que la quema de combustible está íntimamente ligado a la cantidad de emisiones de compuestos que favorecen el efecto invernadero y por lo tanto la contaminación ambiental.

Adicionalmente a los aspectos económicos y medioambientales, es necesario operar el horno de manera segura, es por ello que el presente informe enfatiza también en aspectos de seguridad que deben ser considerados durante el diseño del equipo, con la finalidad de que existan controles que alerten al personal de alguna condición insegura o actúen en caso de peligro eminente.

La implementación de lo descrito en el presente informe es responsabilidad de todo el personal de la Refinería, un verdadero trabajo en equipo llevará a cumplir los objetivos planificados e involucrará a cada uno de ellos con el futuro de la Refinería.

II.- MARCO TEÓRICO

2.1.- LA COMBUSTIÓN

El calor de un horno de Refinería es provisto por la reacción de combustión.

La combustión se define como un conjunto de reacciones químicas exotérmicas que se producen entre las sustancias combustibles y el comburente (oxígeno).

La mayoría de los combustibles conocidos, se componen principalmente de carbono e hidrógeno (con pequeñas cantidades de azufre y compuestos nitrogenados) los que reciben el nombre de hidrocarburos y pueden existir en todas las fases.

La mayor parte de los combustibles son una mezcla de numerosos hidrocarburos y se obtienen del petróleo crudo mediante destilación. Los hidrocarburos más volátiles se vaporizan primero, formando el gas de refinería. Los combustibles menos volátiles pueden obtenerse como resultado de una serie de procesos de destilación ya sea a presión atmosférica o a vacío; o como resultado de un proceso de viscoreducción, con o sin adición de material de corte.

El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el aire, que está formado principalmente por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. El nitrógeno se considera como inerte, pero a temperaturas mayores a 1200°C forma compuestos NO_x (NO , NO_2) en combinación con el oxígeno del aire.

Cuando los gases de combustión se enfrían por debajo de la temperatura de rocío de los productos, que es la temperatura a la cual el vapor de agua empieza a condensarse (temperatura de saturación del agua correspondiente a su presión parcial dentro de la mezcla gas-vapor), las gotas de agua suelen combinarse con algunos de los componentes de los gases de combustión y formar ácidos corrosivos que pueden producir corrosión en zonas metálicas.

Un proceso de combustión es completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre se transforma en SO_2 . En sentido inverso, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible ó componentes no quemados como C, H_2 , CO y OH.

En los procesos de combustión de los hornos de Refinería es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica necesaria (exceso de aire), con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la llama. A pesar de ello, se detecta en los gases de combustión presencia de inquemados, cuya procedencia puede deberse a una mezcla imperfecta de aire-combustible, deficiente distribución de aire en el quemador, combustible líquido mal pulverizado, mal estado de las boquillas de ingreso de gas y aceite en quemadores, entre otros.

Los inquemados son arrastrados por los gases de combustión, ennegreciéndolos. Estos son la principal causa del ensuciamiento de los tubos ubicados en la zona convectiva del horno, lo que provoca una deficiente transferencia de calor en esta zona y por lo tanto una disminución de la eficiencia energética al no aprovechar todo el calor sensible de los humos de la combustión.

La temperatura que se puede obtener mediante un combustible depende no sólo de su poder calorífico sino también de la técnica utilizada en la combustión. Los factores que influyen en la temperatura que se consigue en la combustión de un combustible son: El poder calorífico, la cantidad de gas diluyente, la temperatura del combustible y del aire y la mezcla íntima entre ambos.

La cantidad de gas diluyente, usualmente nitrógeno, que entra con el oxígeno:

Utilizando una proporción normal de oxígeno y nitrógeno que hay en el aire, el nitrógeno absorberá unas tres cuartas partes del calor.

Cualquier exceso de aire sobre la cantidad requerida estequiométricamente actúa como diluyente.

La temperatura del combustible y del aire antes de la combustión:

El calor sensible de los reactantes se sumará al poder calorífico, determinando el calor total disponible en los productos de combustión.

La mezcla íntima entre el combustible y el comburente que está relacionado íntimamente con el diseño del quemador:

Los tres primeros factores son cantidades que pueden medirse y controlarse para obtener valores deseados, fijados éstos, la temperatura que se obtenga dependerá todavía de la velocidad de reacción y por lo tanto del diseño del quemador.

Es posible calcular la temperatura de llama. Una temperatura ideal de llama puede calcularse suponiendo: Reacción completa con la cantidad estequiométrica exacta de aire, mezclado perfecto y combustión instantánea de manera que no haya pérdidas de calor durante la misma.

El contenido calorífico total de los reactantes más los inertes (N_2 del aire) se calcula respecto a la temperatura ambiente refiriéndolo a la unidad de masa ó a la unidad de volumen y se le suma el calor de reacción. El valor de esta suma se toma como contenido calorífico de los productos. Se calcula el volumen o la masa de los productos, y con la suma anterior, usando un valor apropiado del calor específico puede calcularse la temperatura. Esta temperatura ideal de llama es más elevada que la que puede obtenerse en la realidad.

2.2.- LOS HORNOS EN LAS REFINERÍAS DE PETROLEO

En las refinerías de petróleo, los hornos de proceso son utilizados para calentar y/o vaporizar fluidos que viajan a través de tubos localizados en su interior.

El tipo de horno se seleccionará según la cantidad de energía que debe absorber su carga, la que será entregada por los quemadores:

- Hasta 25Gcal/h: Horno Cilíndrico Vertical con zona radiante más convectiva
- Más de 25Gcal/h hasta 76Gcal/h: Horno Tipo Cabina de Tubos Horizontales con zona radiante más convectiva.

El horno puede estar compuesto por una zona radiante y en adición una zona convectiva. La carga se precalienta en el banco de tubos de la zona convectiva para luego hacer su ingreso a la zona radiante donde se da la mayor parte de la transferencia de calor.

El horno según su fabricación, podría estar preparado para operar a tiro natural o forzado (con extractores, equipos de recuperación de calor y soplantes de aire).

Para realizar labores de operación y mantenimiento, el horno dispone de una serie de plataformas de servicio que dan acceso a las puertas de inspección y mirillas de observación.

La zona alta de radiación del horno dispone de puertas de seguridad, con objeto de aliviar el aumento de presión que se puede producir en caso de explosión.

Está recubierto en todo su interior por refractario aislante, para contener el calor liberado y minimizar las pérdidas hacia el ambiente.

Todo horno cumple un papel fundamental dentro de las Unidades de Proceso de las Refinerías, ya sea entregando calor sensible o calor latente a la carga que viaja por sus tubos (Para producir un incremento de temperatura o un cambio de fase según lo requiera el proceso). A continuación en la *figura 2.1* se mostrará el esquema de una refinería de petróleo para luego describir sus unidades, con el objetivo de incidir en la participación de los hornos de proceso en cada una de ellas.

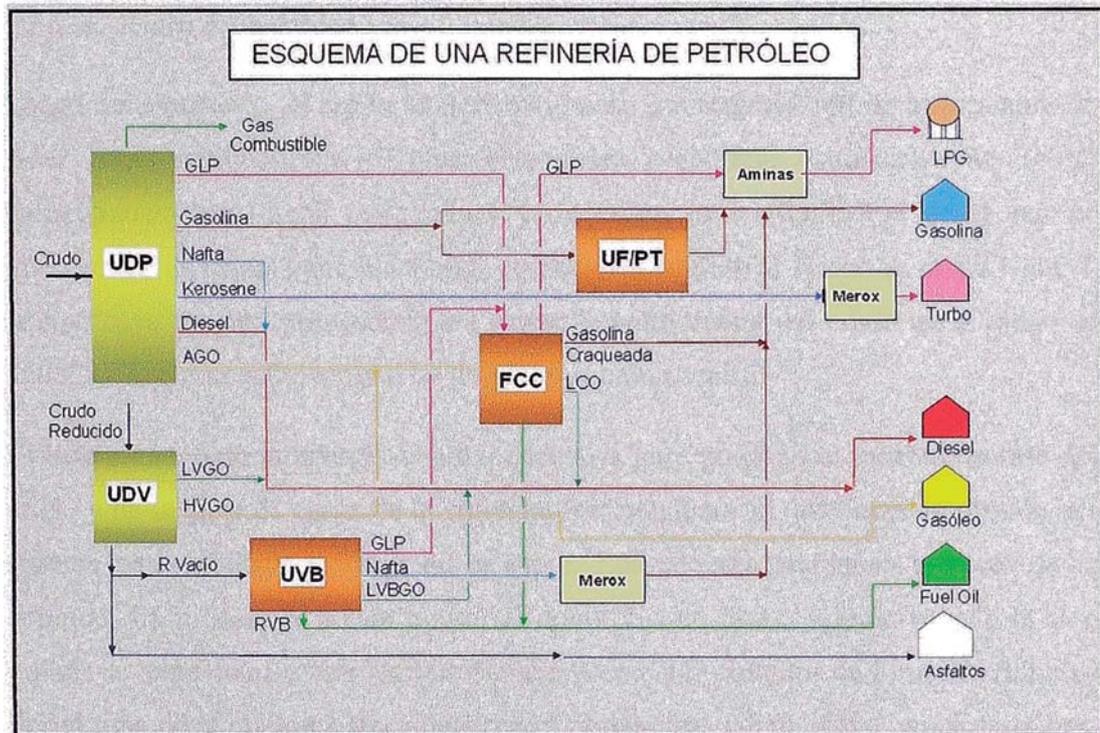


Figura 2.1: Esquema de una Refinería de Petróleo

2.2.1.- UNIDADES DE PROCESO DE UNA REFINERÍA Y LA PARTICIPACIÓN DE LOS HORNOS EN CADA UNA DE ELLAS

Unidad de Destilación Atmosférica:

La destilación atmosférica es un proceso que permite el fraccionamiento natural del crudo sin afectar sus estructuras moleculares; basándose en las diferentes temperaturas de ebullición de sus componentes, con la finalidad de obtener productos finales e intermedios.

El proceso inicia con el precalentamiento de crudo en una red de intercambio de calor con productos terminados y reflujos fríos hasta una temperatura de 120°C aproximadamente, temperatura óptima para el inicio del proceso de desalado, cuyo

propósito es eliminar sales e impurezas que podrían ocasionar corrosión en equipos y tuberías dentro de la unidad.

Luego del desalado, el crudo es derivado hacia una segunda red de intercambio de calor para continuar con el precalentamiento hasta una temperatura de 240°C aproximadamente (dicha temperatura varía según la configuración de la red de intercambio de calor) para que a estas condiciones ingrese al Horno de dicha Unidad, equipo cuya función primordial será elevar la temperatura del crudo en el rango de 360°C-370°C, antes del umbral de descomposición térmica.

El horno transfiere la energía térmica necesaria para producir el cambio de fase del crudo y en la zona de carga de la columna fraccionadora se disminuye la presión del sistema para producir el flash de la carga. Los vapores ascienden a través de la columna fraccionadora donde ocurre el equilibrio de fases (líquido-vapor), la fase líquida se logra con los hidrocarburos que regresan a la columna en forma de reflujos. Por el tope de la columna fraccionadora se obtiene gas combustible, glp y gasolinas, los cortes laterales están conformados por las naftas, turbo, diesel, gasóleos y por los fondos se obtiene el crudo reducido que es enviado como carga a la columna de destilación a Vacío para continuar con su fraccionamiento. *Ver Esquema de Proceso en la figura 2.2.*

Unidad de Destilación a Vacío:

El crudo reducido proveniente de la Unidad de Destilación Primaria se procesa en la Unidad de Destilación a vacío con la finalidad de destilar componentes que a presión atmosférica se craquearían, ya que se tendría que elevar tanto la temperatura a la salida del horno que se superaría el umbral de descomposición térmica.

La energía térmica necesaria para vaporizar el crudo reducido es suministrada en los hornos de la Unidad que trabajan en un rango de temperaturas de salida de 395 a

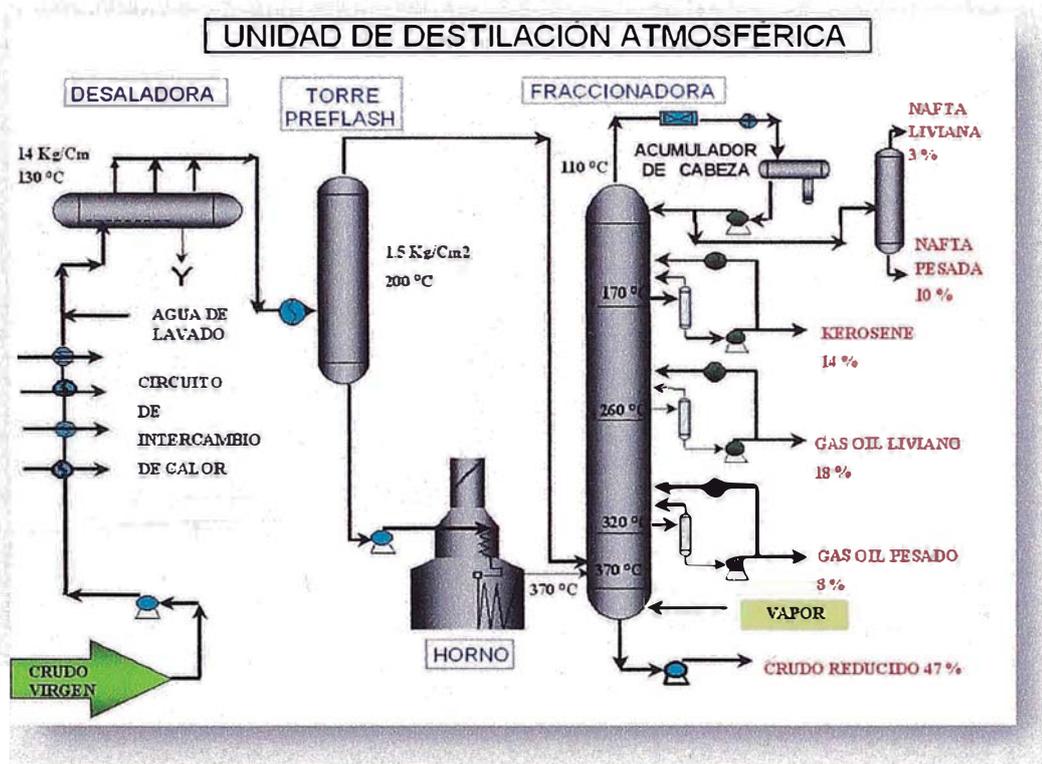


Figura 2.2: Diagrama de la Unidad Destilación Atmosférica

405°C, dicha temperatura será función de la cantidad y calidad de los productos que se deseen obtener. La columna trabaja a vacío con una presión absoluta de unos 20mmHg en la zona de carga y está formada por empaques que permiten el contacto líquido-vapor, favoreciendo así la transferencia de masa. Los productos que se obtienen son: Gasóleo ligero de vacío que es derivado al pool de diesel, Gasóleo pesado de vacío que es derivado como carga a las Unidades de Craqueo catalítico y Residual de vacío que es derivado como carga a la Unidad de Visbreaking o hacia tanques de asfaltos (según su calidad). *Ver Esquema de Proceso en la Figura 2.3.*

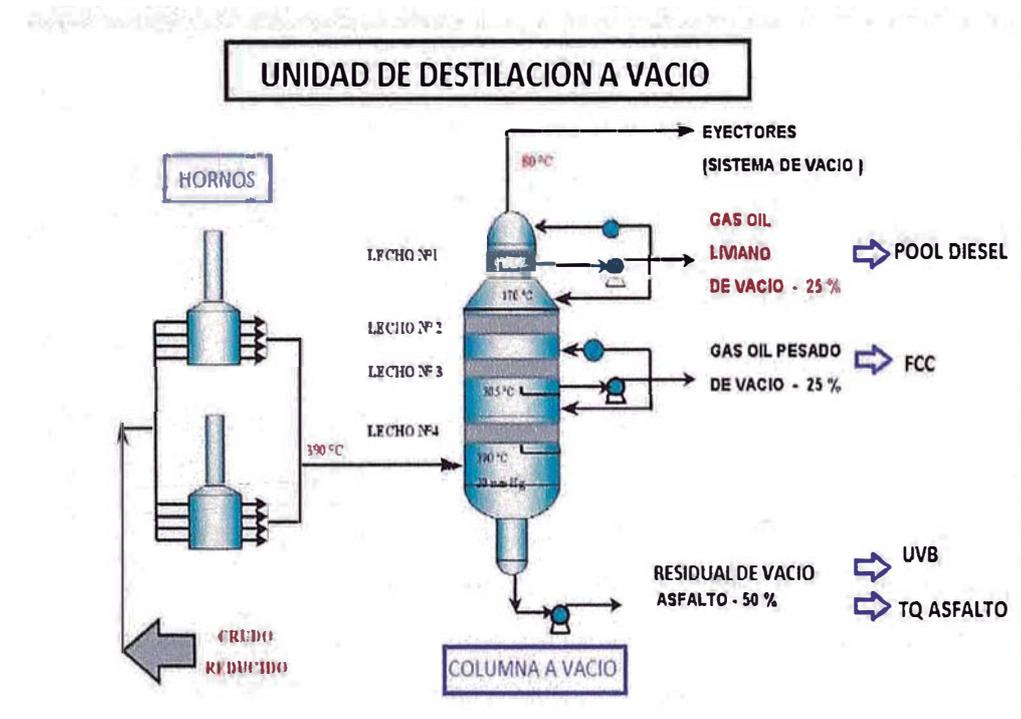


Figura 2.3: Diagrama de la Unidad Destilación a Vacío

Unidad de Hidrotratamiento

La Unidad de Hidrotratamiento tiene como objetivo el acondicionamiento de la carga a la Unidad de Reformación Catalítica. El hidrotratamiento es un proceso de remoción de metales, junto con la eliminación de azufre, oxígeno y nitrógeno.

La gasolina primaria (nafta pesada) proveniente de la unidad de destilación atmosférica ingresa junto con el hidrógeno (proveniente del gas de reciclo) al precalentador de carga de la unidad, donde intercambia calor con la corriente efluente del reactor y se precalienta hasta una temperatura aproximada de 250°C.

Luego del precalentamiento, la mezcla ingresa al horno en fase vapor, es aquí donde se alcanza la temperatura requerida para reacción de hidrotratamiento, la cual varía entre 314 y 343°C según la actividad del catalizador.

Luego del calentamiento en el horno, dicha mezcla ingresa al reactor de lecho fijo donde se llevan a cabo las reacciones de: desmetalización, saturación de olefinas, remoción de azufre y remoción de nitrógeno, a una presión de 30Kg/cm²g aproximadamente.

El efluente del reactor luego de intercambiar calor con la carga en el precalentador, es enfriado mediante aeroenfriadores hasta 38°C, para luego pasar a un separador trifásico, donde se separan la fase gas (gas combustible), agua e hidrocarburo líquido (nafta tratada). La nafta tratada es enviada a un despojador para eliminar H₂S, H₂O e hidrocarburos ligeros, con el objetivo de darle el punto inicial apropiado como carga a la Unidad de Reformación, mínimo 77°C. La carga al despojador es precalentada hasta una temperatura de 135°C mediante un intercambiador que recupera calor del producto de fondos.

El calor necesario para realizar el despojamiento de los componentes ligeros y contaminantes es suministrado mediante un horno que calienta los fondos hasta una temperatura de 220°C, esta temperatura varía según la calidad de carga. *Ver Esquema de Proceso en la figura 2.4.*

Unidad de Reformación Catalítica

La Unidad de Reformación Catalítica tiene como objetivo convertir nafta pesada (gasolina primaria) de bajo número de octano, en nafta reformada de alto octanaje (alrededor de 98), además de GLP e Hidrógeno. La nafta tratada proveniente de la Unidad de Hidrotratamiento se mezcla con hidrógeno (proveniente del gas de reciclaje) en una relación molar de 1:4 respectivamente. Aguas abajo de esta mezcla se inyecta 0.6 ppm de cloruros y 0.4 ppm de agua, aditivos que requiere el catalizador para



Figura 2.4: Diagrama de la Unidad de Hidrot ratamiento

mantener su actividad. Dicha mezcla se precalienta con el efluente del último reactor hasta una temperatura de 450°C, ingresando luego a la zona de reacción.

La zona de reacción consta de tres reactores en serie de lecho fijo que contienen catalizador en base a metales activos de Platino y Renio. En esta zona, la carga es calentada en un horno hasta la temperatura de reacción 500-540°C, temperatura que varía según la actividad del catalizador para de esta manera hacer su ingreso al primer reactor de lecho fijo. Así sucesivamente, la carga ingresa a los tres reactores en serie contando cada uno con su propio horno. Los reactores trabajan a una presión promedio de 32Kg/cm²g.

Las reacciones que se llevan a cabo son: deshidrogenación de naftenos a aromáticos, isomerización, dehidrociclización de parafinas e hidrocracking.

Después de la sección de reacción, la fase líquida es separada de la fase gaseosa en un separador de alta presión, aquí se separa el hidrógeno que es consumido en la misma Unidad y en la Unidad de Hidrotratamiento. La fase líquida es enviada a la estabilizadora que opera a una presión aproximada de 18Kg/cm² y cuya función principal es ajustar el PVR (Presión de Vapor Reid) de la gasolina reformada. *Ver Esquema de Proceso en la figura 2.5.*

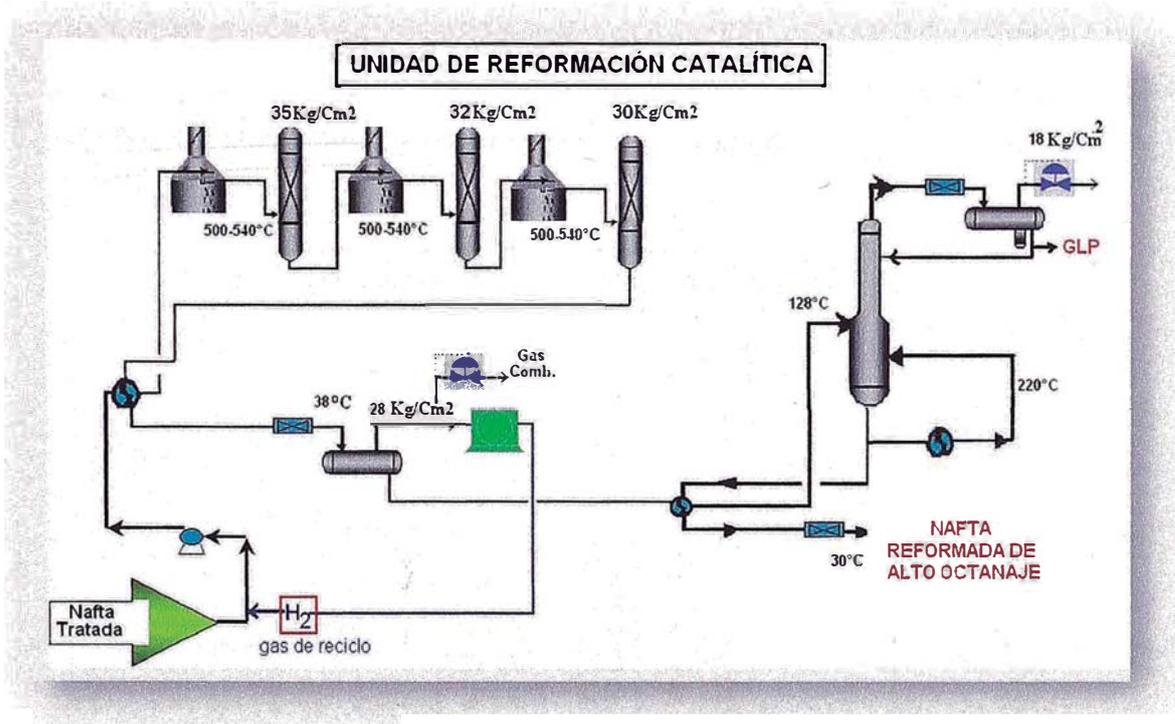


Figura 2.5: Diagrama de la Unidad de Reformación Catalítica

Unidad de Visbreaking

El objetivo de la Unidad de Visbreaking es reducir la viscosidad del residual de vacío y simultáneamente producir compuestos más ligeros como gas, nafta y destilados medios.

El proceso tiene dos versiones según que la reacción se produzca en un horno ó bien que se inicie en un horno y se termine en una cámara denominada soaker. En el sistema sin soaker, el residuo de vacío sale del horno a una temperatura del orden de los 450°C y se le da un corto tiempo de residencia, del orden de un minuto, tiempo suficiente para que se completen las reacciones de cracking. Cuando se utiliza soaker la temperatura en el horno es entre 30 y 40°C más baja y las reacciones se completan en el soaker, donde el tiempo de residencia suele ser del orden de 10 a 20 minutos. Antes de hacer su ingreso a la columna fraccionadora el efluente debe enfriarse para detener la reacción, lo que se consigue por mezcla con el reciclo frío del fondo de la torre fraccionadora. Ver Esquema de Proceso en la figura 2.6.

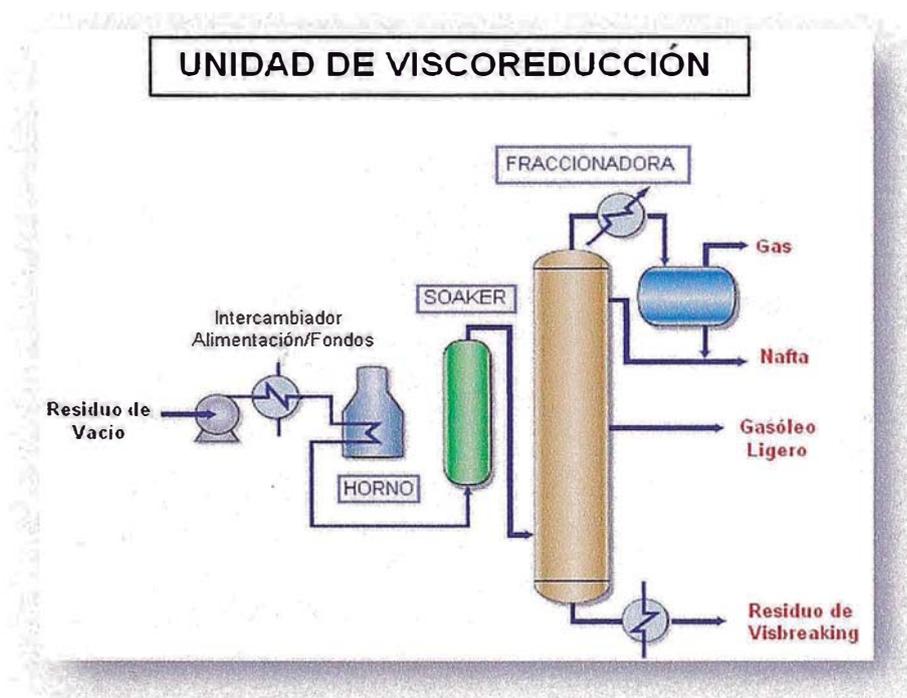


Figura 2.6: Diagrama de la Unidad de Viscoreducción

2.3.- PARTES DE UN HORNO DE REFINERÍA

2.3.1.-DIAGRAMA DEL EQUIPO IDENTIFICANDO SUS PARTES

En la *figura 2.7* se muestra la configuración típica de un horno de refinería de petróleo con zona radiante y zona convectiva. La *figura 2.8* muestra un horno de Destilación Primaria de igual configuración a la arriba mencionada.

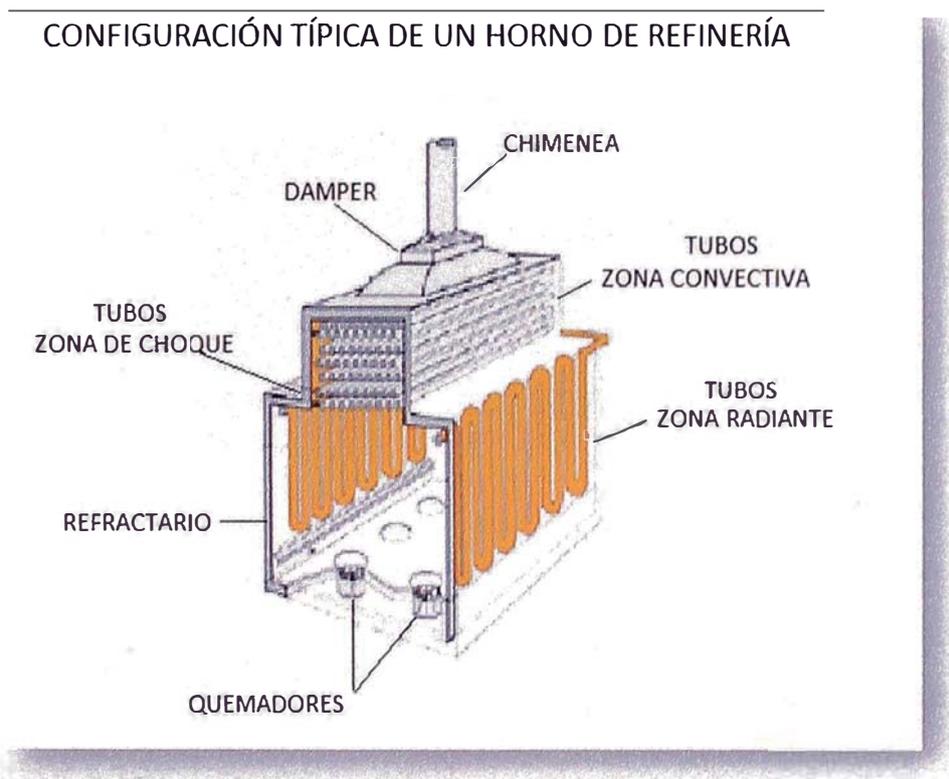


Figura 2.7: Configuración Típica de un Horno de Refinería

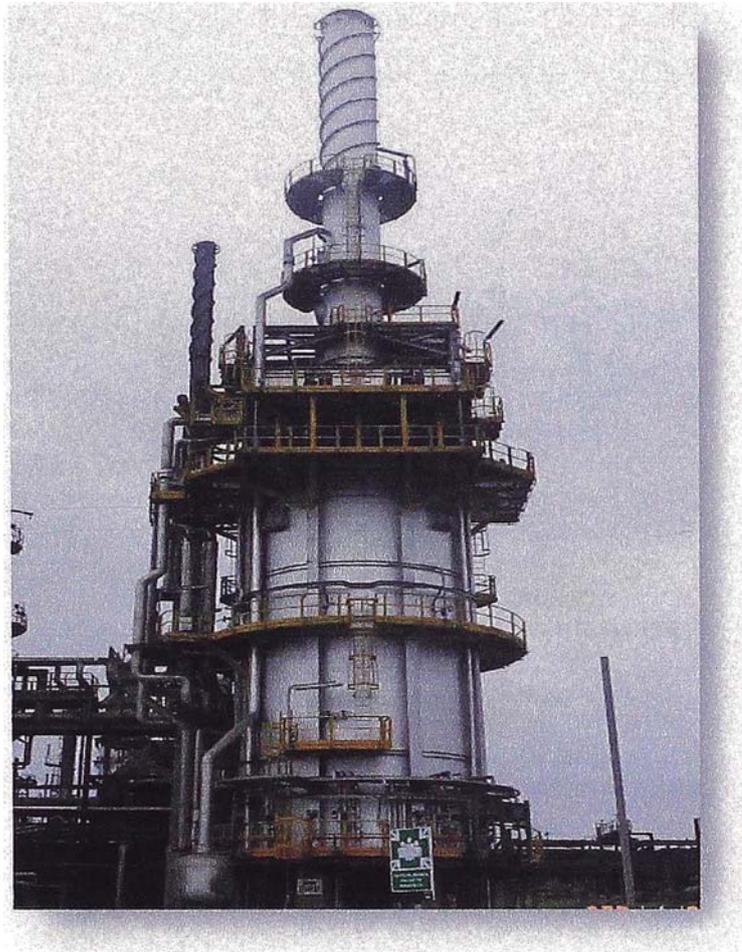


Figura 2.8: Horno de Destilación Primaria de una Refinería de Petróleo

2.3.2- QUEMADORES

Los quemadores son los equipos donde se produce la combustión entre el combustible y el comburente para la generación del calor en los hornos de proceso, pueden estar diseñados para quemar aceite combustible, gas combustible o la combinación de ambos.

La combustión se lleva a cabo en la boquilla de fuel oil y en las boquillas de fuel gas (principal y pilotos). El resto de componentes del quemador se utilizan, para dirigir la

forma de la llama, para controlar el caudal del aire de la combustión y optimizar el consumo de combustible. Ver *figura 2.9* donde se muestra la configuración típica de un quemador.

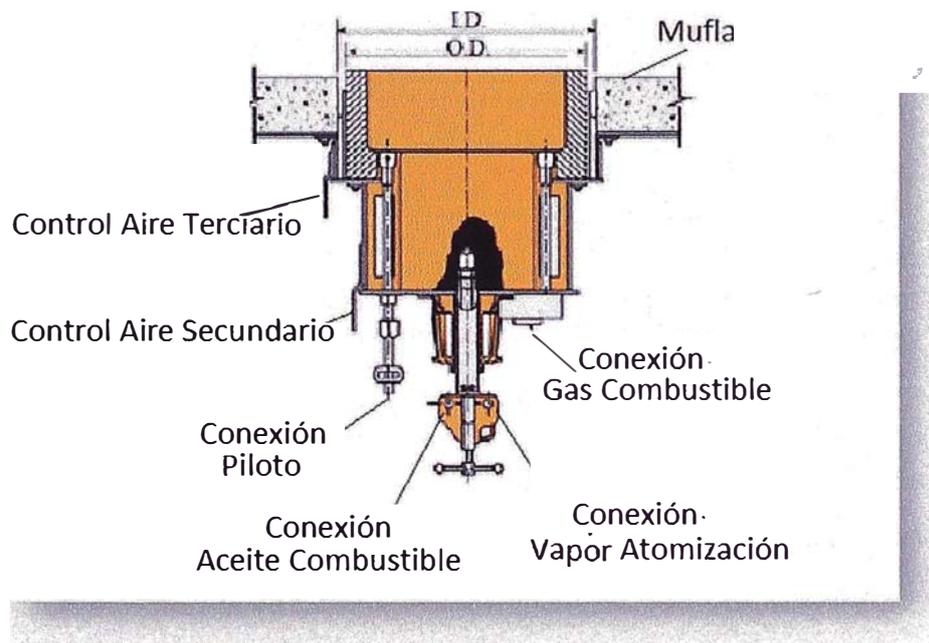


Figura 2.9: Configuración Típica de un Quemador

Una de las variables de operación más importantes del horno es el %O₂ el cual corresponde al exceso de aire de combustión. Dicha variable, se controla mediante las válvulas manuales de ingreso de aire existentes en cada quemador.

Los quemadores se instalan normalmente en el fondo del horno o en las paredes verticales y trabajan bajo su curva de liberación de calor entregada por el fabricante del quemador para cada tipo de combustible (gas o aceite), quien garantiza que a la liberación máxima no se produzca impacto de llama en los tubos ni en el refractario. a curva de liberación relaciona la cantidad de calor entregada por cada quemador con la presión del combustible presente en cada quemador. *Ver figura 2.10.*

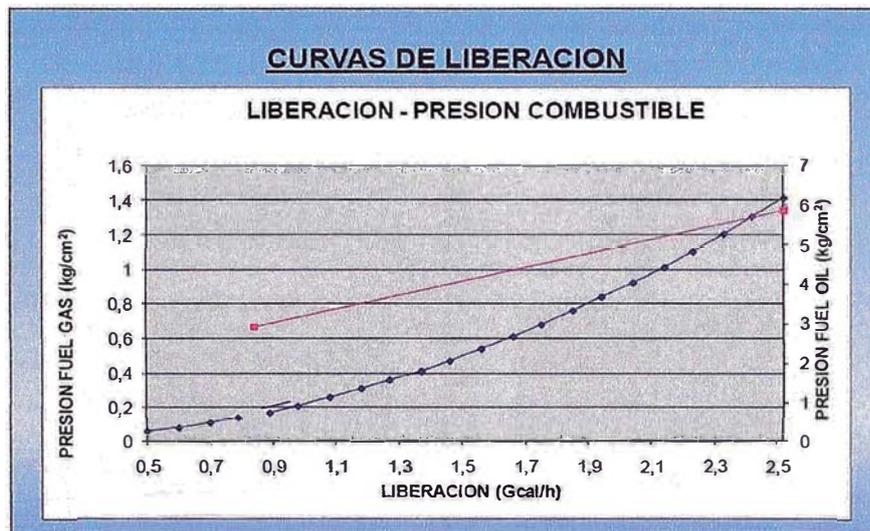


Figura 2.10: Curva de Liberación para Gas y Aceite: Fuente ATEPISA

2.3.3.- TUBOS DE LA ZONA CONVECTIVA Y RADIANTE

Los tubos de la zona convectiva están compuestos por una serie de primeras filas de tubos lisos (Zona de Choque) y el resto normalmente es de superficie extendida. Comúnmente cuando se diseñan los quemadores del horno sólo para quema de gas combustible la superficie extendida es aleteada y cuando se diseñan para quema de aceite combustible es pitoneada.

La zona radiante está compuesta por tubos lisos, cuya longitud promedio de diseño se sitúa en 15 metros como máximo para tubos verticales y 24 metros de longitud como máximo para tubos horizontales. El número de pasos se diseña en función al diferencial de presión disponible.

La carga es precalentada en los tubos de la zona convectiva con los gases de la combustión, para luego hacer su ingreso a los tubos de la zona radiante. Ver en la *figura 2.11* la configuración típica de los tubos de dichas zonas.

Existen sopladores de hollín fijos y retráctiles. Los sopladores fijos se encuentran permanentemente dentro de la zona convectiva, tienen una lanza con boquillas de vapor. El vapor es soplado a través de las boquillas hacia los espacios de paso de gases entre los tubos para mantenerlos limpios y libres de suciedad.

Los sopladores retráctiles están ubicados fuera de la zona convectiva del horno, están compuestos por una lanza rotatoria con una boquilla de vapor en el extremo, que hace su ingreso de manera perpendicular a la zona convectiva del horno, al final del recorrido invierte el sentido del desplazamiento; el ciclo de trabajo se completa cuando la lanza vuelve a su posición original. Ver *figura 2.12*.

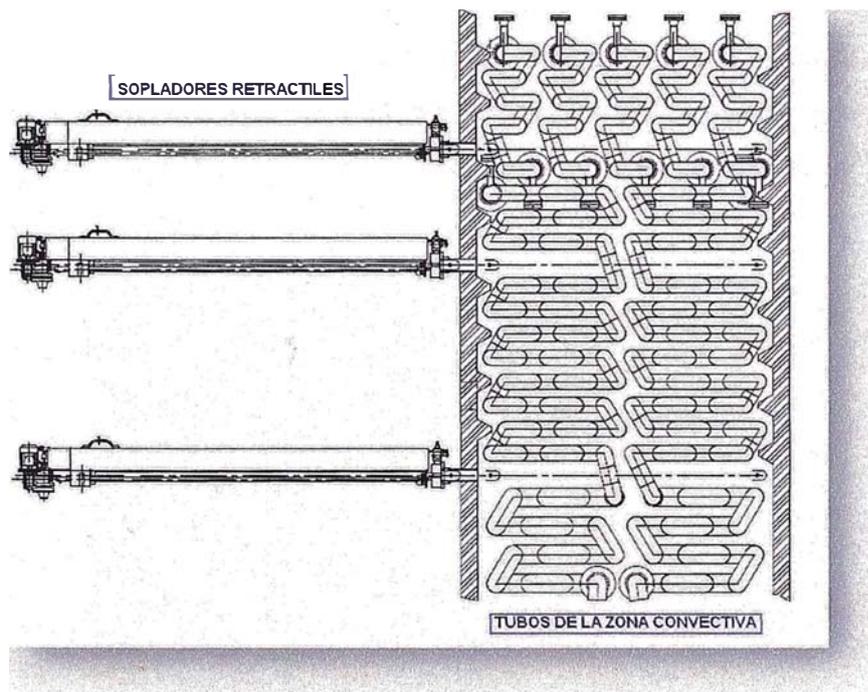


Figura 2.12: Configuración Típica de Sopladores Retráctiles en la Zona Conectiva

2.3.5.- VALVULA QUE ADMITE EL INGRESO DE GASES DE COMBUSTIÓN A LA CHIMENEA

Llamada comúnmente dámper es la válvula que admite el ingreso de gases de combustión a la chimenea para de esta manera controlar el tiro en el horno. Ver *figura 2.13*.

El tiro es la fuerza que impulsa a los gases a través del horno. Los gases calientes de la combustión son de menor densidad que el aire externo del medio ambiente, esto genera una presión ligeramente negativa dentro del horno; esta diferencia de presiones hace posible que el aire necesario para la combustión atraviese los quemadores así como que los gases resultantes atraviesen la chimenea del horno. Cabe resaltar que el paso de los gases de combustión a través de la zona convectiva y chimenea, encuentra cierta resistencia de fricción, por lo tanto el diseño siempre considera una altura de chimenea adecuada, con el fin de asegurar siempre presión negativa dentro del horno. Ver en la *figura 2.14* el perfil de presiones solicitado en un horno.

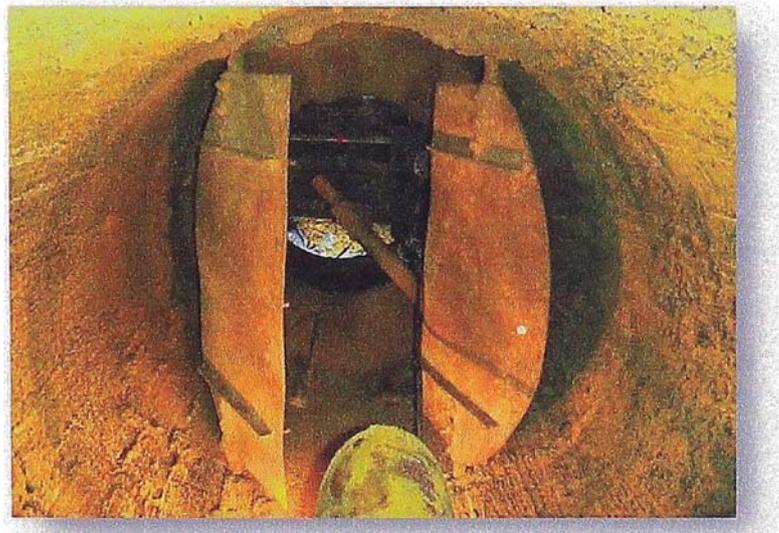


Figura 2.13: Vista de un Dámper de un Horno de Refinería

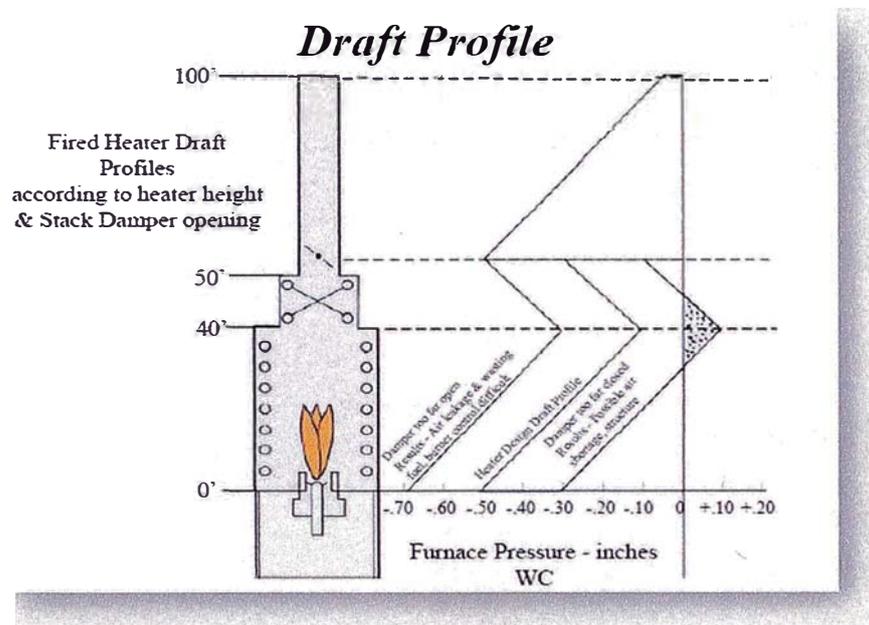


Figura 2.14: Perfil de Presiones en la Cabina de un Horno de Refinería

2.4- PARTICIPACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE UN HORNO DENTRO DE LOS COSTOS VARIABLES DE LA REFINERÍA

El creciente auge que tiene la eficiencia energética en el mundo, hace que muchas industrias como las Refinerías de Petróleo, se encaminen en conseguir más resultados con menos recursos, lo cual se traduce en menores costos de producción, más productos con menos desperdicios, menores consumos de energía y menores niveles de contaminación.

Encaminados en conseguir estos resultados, las Refinerías centran su mirada en los equipos que consumen mayor energía, es aquí cuando los hornos de proceso cobran gran importancia.

Cabe resaltar que los costos de energía (combustibles utilizados en hornos) representan aproximadamente el 94% de los costos variables de las Refinerías (Combustibles, Agua, Electricidad, Catalizador, Productos Químicos). Ver *figura 2.15*.

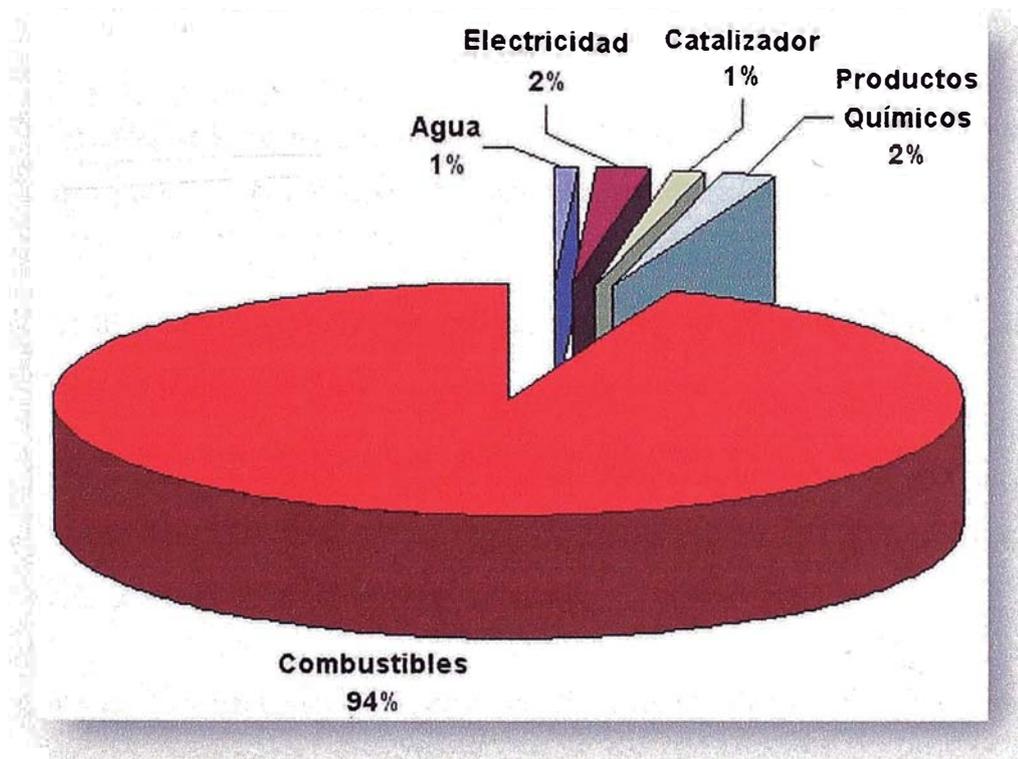


Figura 2.15: Participación del Costo de Combustibles en los Costos Variables

III.- OPERACIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE HORNOS DE REFINERÍAS DE PETRÓLEO

- En este capítulo se detallará la problemática actual de los hornos de proceso en las Unidades de las Refinerías de Petróleo.
- Se abordarán también medidas preventivas y de monitoreo para conseguir una eficiente operación de estos equipos.
- En adición, se indicarán ciertos criterios de seguridad que deben implementarse para una correcta operación de los Hornos de Proceso.

3.1.- PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS HORNOS DE PROCESO EN LAS REFINERÍAS DE PETRÓLEO

Una de las principales limitaciones encontradas para lograr los objetivos descritos, es operar eficientemente un horno de proceso de varios años de operación, es decir conseguir que trabaje con su eficiencia de diseño.

El grado de entrenamiento de operadores de campo y de consola, determina la correcta y segura operación de un horno.

A continuación se detallarán cuáles son los principales problemas operativos, que impiden lograr la eficiencia deseada, que en muchos casos guardan relación con el escaso mantenimiento e inspección en dicho equipo.

1.-Alta temperatura de metal de tubos por bajo flujo de carga por los pasos del horno y por incidencia de llama

Uno de los principales problemas encontrados en los hornos de las refinerías, es el desequilibrio del flujo de calor a través de los pasos individuales del horno, este desequilibrio generalmente es provocado por operar debajo del flujo mínimo de masa requerido por área transversal de tubo.

Este desequilibrio, puede producir altas temperaturas de piel de tubos con la consecuente formación de coque, que reduce la transferencia de calor a través de los tubos y por lo tanto reduce la capacidad de operación del horno.

Otra de las principales causas de coquización, es la incidencia de llama directamente en los tubos, que provoca un calentamiento localizado y facilita la formación de coque. Dicha incidencia de llama puede tener las siguientes causas:

- No operar el horno con todos sus quemadores en servicio, es decir sobrepasar la liberación máxima de un solo quemador para lograr el calor requerido.
- Operar con un insuficiente ingreso de aire primario y secundario en los quemadores.
- Operar con quemadores cuyas boquillas de gas o aceite se encuentren obstruidas, deterioradas o erosionadas. Ver *figuras 3.1 y 3.2*.
- Operar con insuficiente tiraje en el horno.
- Operar los quemadores con muflas mal instaladas o que utilizan morteros inadecuados (pegamento para unir las partes de la mufla). Ver *figuras 3.3, 3.4 y 3.5*. Cabe resaltar que bloques de muflas dañados tiene un efecto negativo en la forma de la llama, ya que las muflas moldean el patrón de las llamas

En las *figuras 3.6 y 3.7* se muestran dos llamas típicas malformadas que inciden sobre los tubos de un horno de una Unidad de Destilación a Vacío. La *figura 3.6* corresponde a una llama de aceite combustible (amarillenta) mientras que la *figura*

3.7 corresponde a una llama de gas combustible. En ambos casos el desorden de las llamas fue provocado por una regulación incorrecta de aire para la combustión, mal estado de los quemadores, boquillas erosionadas, muflas en mal estado e inadecuada posición de los quemadores con respecto al piso del horno.



Figura 3.1: Boquilla de gas combustible en mal estado



Figura 3.2: Boquilla de gas combustible en buen estado



Figura 3.3: Muflas instaladas con mortero inadecuado (no soportan altas temperaturas) que desencadenan lo observado en la Figura 3.4.

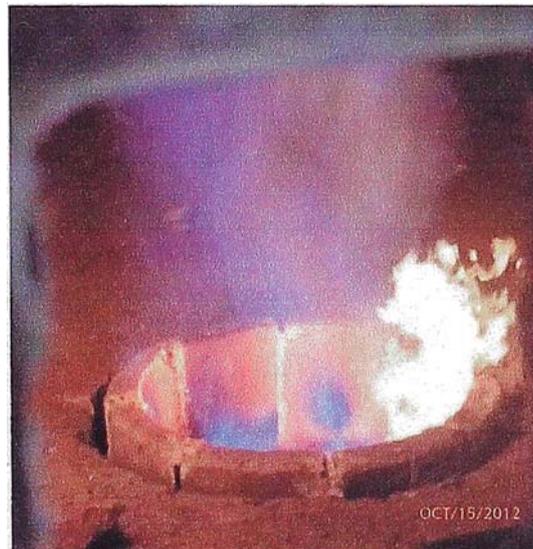


Figura 3.4: Malformación de llamas

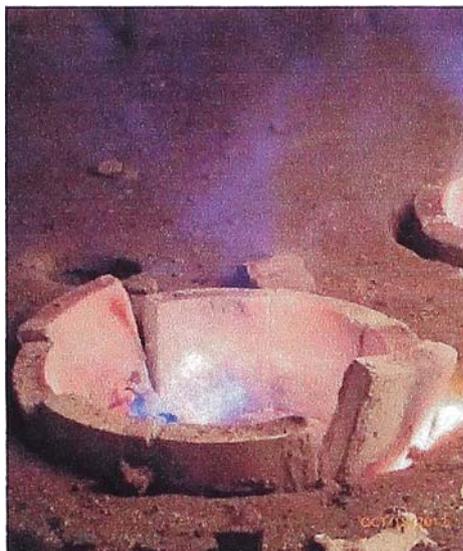


Figura 3.5: Mufla que quedó desubicada luego de la dilatación térmica en maniobras de arranque, ya que el diámetro interno no fue diseñado de acuerdo a planos del fabricante

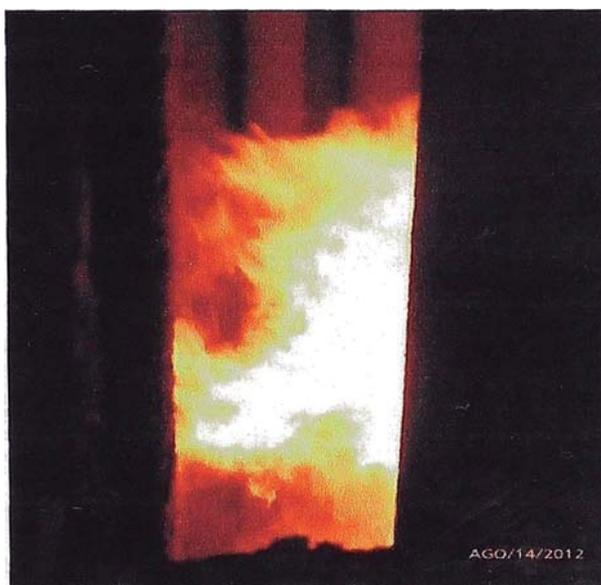


Figura 3.6: Llama de aceite combustible con Incidencia en Tubos de la Zona de radiación de un Homo de Destilación a Vacío



Figura 3.7: Llama de gas combustible con Incidencia en Tubos de la Zona de radiación de un Horno de Destilación a Vacío

2.- Presión positiva en el techo de radiación del horno y elevado exceso de aire de combustión.

Presión positiva dentro de la cabina de un horno de proceso ocasiona:

- Llamas de gran longitud que inciden en los tubos de la zona convectiva generando puntos calientes.
- Derrame de aceite combustible por no alcanzar el tiro requerido por el quemador, medido en la base del horno. Ver *figuras 3.8 y 3.9*.
- Escape de gases de combustión por las mirillas del horno, que impide realizar un monitoreo diario del estado de los componentes del horno llámense instrumentos, sopladores, quemadores, entre otros, por las constantes fugas de gases a la atmósfera en zonas cercanas al operador.



Figura 3.8: Derrame de aceite combustible por tiro insuficiente en base del horno.



Figura 3.9: Derrame de aceite combustible en un Horno de Destilación que causa coquificación en las boquillas de combustibles, obstruyéndolas.

Una correcta regulación del tiro guarda una estrecha relación con el control de oxígeno para la combustión, se debe de fijar un valor de oxígeno regulando gradualmente el tiro.

El ingreso de aire parásito en el horno incrementan también el exceso de aire en la combustión, esto puede deberse a:

- Agujeros innecesarios en la base del horno. Ver *figuras 3.10 y 3.11*.



Figura 3.10: Entradas de aire parásito

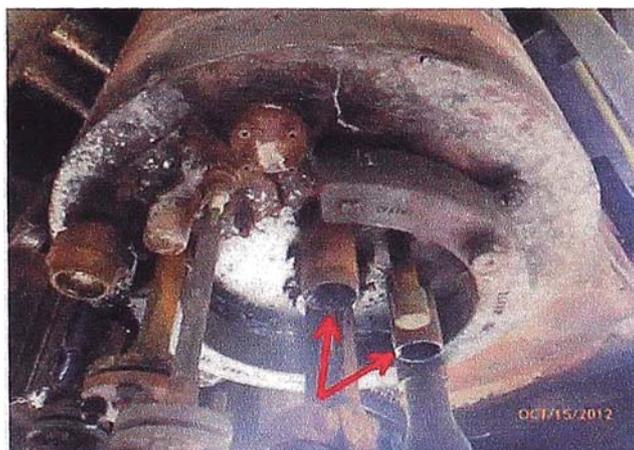


Figura 3.11: Entradas de aire parásito

- Mal cierre de mirillas por parte del operador cuando realiza su inspección o por mirillas obstruidas ya que los inquemados también suelen depositarse en el marco de éstas imposibilitando su cierre. Ver *figura 3.12*.

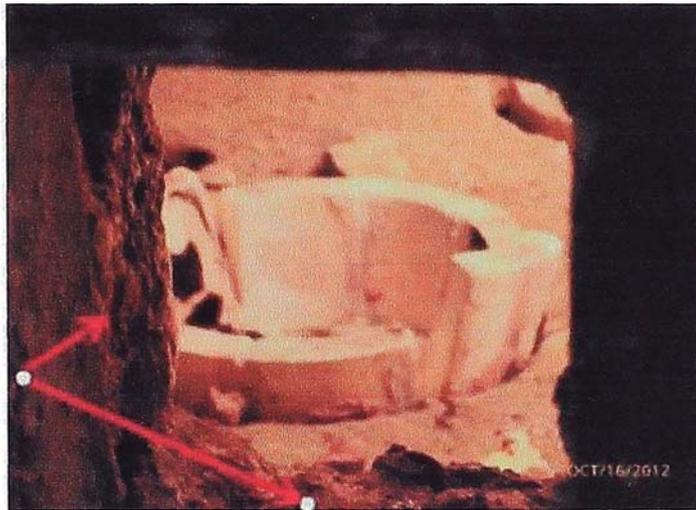


Figura 3.12: Inquemados depositados en las mirillas que imposibilitan su cierre

Asimismo un escaso mantenimiento a las persianas de ingreso de aire a los quemadores desencadena una regulación incorrecta, generalmente éstas se obstruyen por causa de la oxidación. Ver *figura 3.13*.

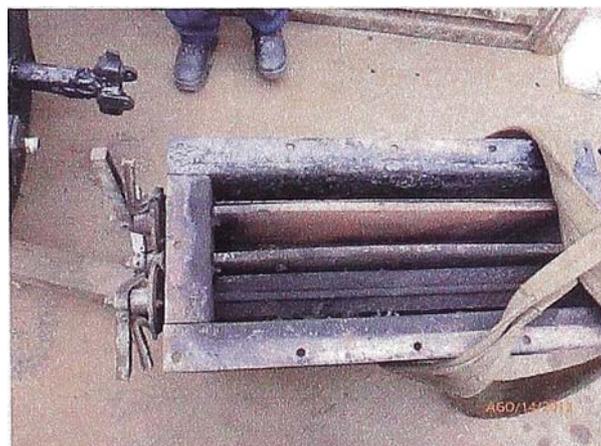
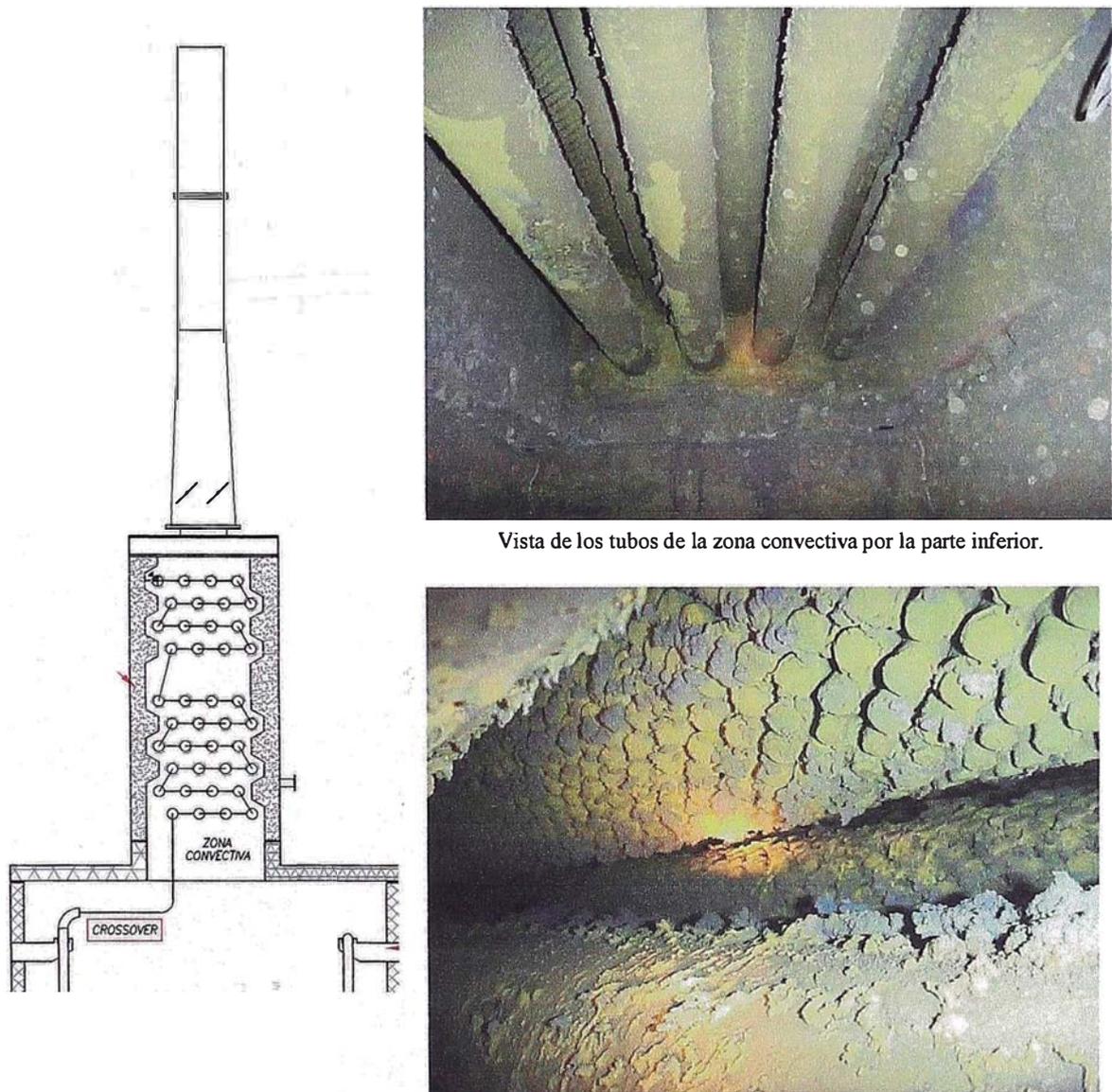


Figura 3.13: Oxidación de manetas de persianas de ingreso de aire

3.- Elevada temperatura de gases de chimenea, ocasionada por ensuciamiento de la zona convectiva, con depósito de inquemados entre las aletas y pitones, producto de la combustión incompleta, mal estado de quemadores y/o sopladores.



Vista de los tubos de la zona convectiva por la parte inferior.

Vista de los sólidos y hollín acumulados en los tubos lisos y en los tubos tetonados de la zona convectiva (fila 1, 2 y 3 parte central).

Figura 3.14: Reporte del estado de la Zona Convectiva de un Horno de Refinería

3.2.- CONTROLES PARA UN BUEN DESEMPEÑO OPERATIVO

3.2.1.- Monitorear Flujo de Masa por Área de Superficie Transversal de Tubos (Ver gráfica 3.15)

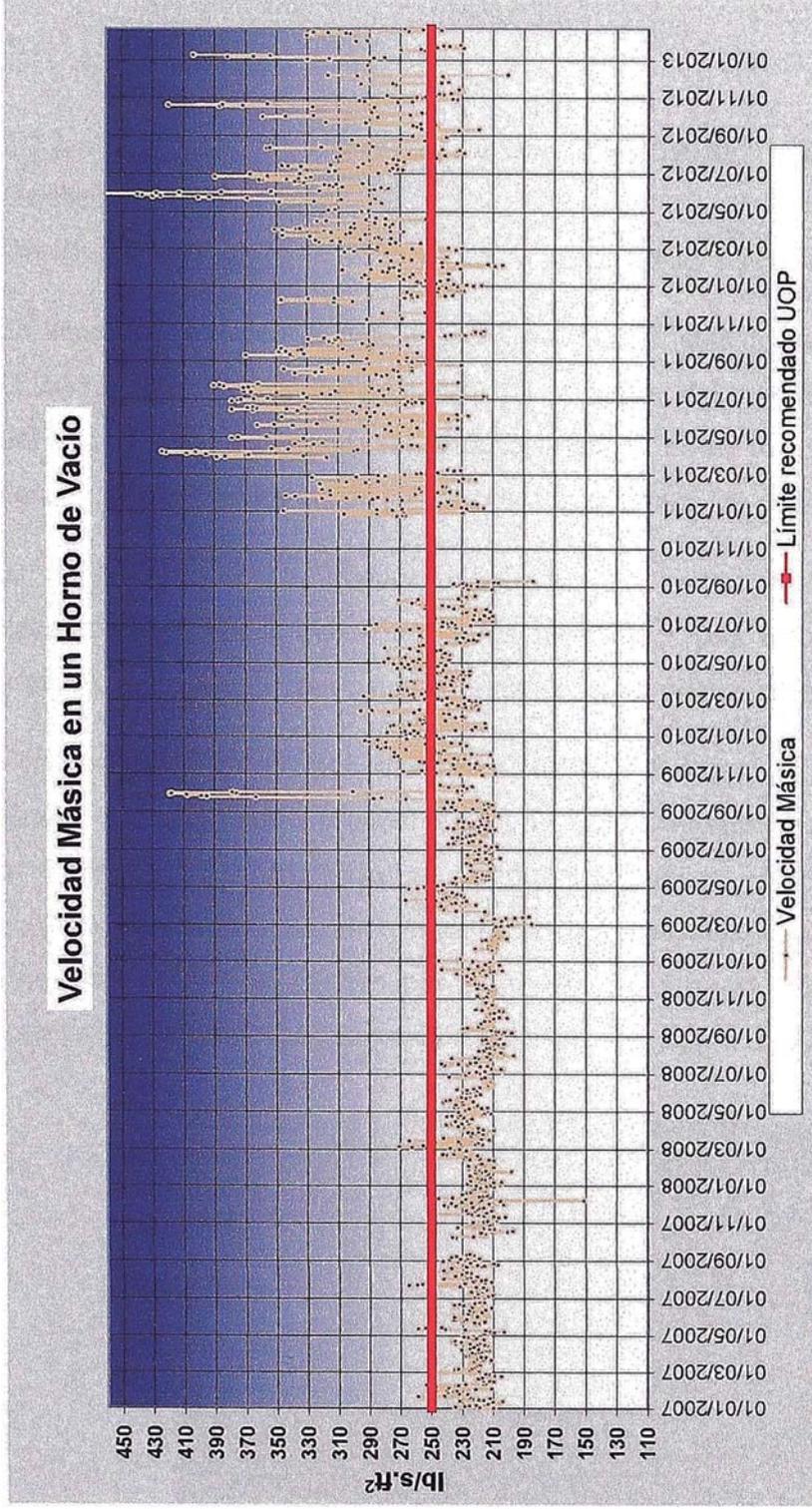
Objetivo: Evitar bajas velocidades que originan el aumento de espesor de la película de líquido formada entre el fluido de proceso y el metal, lo que disminuye la transferencia de calor al fluido por aumento de la resistencia, que puede generar alta temperatura del metal de tubos con la consecuente coquificación del producto.

Es conveniente seguir el criterio de flujo de masa por área transversal de tubos de tablas elaboradas por UOP, Exxon, entre otros especialistas. Ver *Gráfico 3.1*.

Fired Heater Specification

Process	Radiant Flux, Btu/h-ft ²	Mass Velocity, lb/sec-ft ²	Process ΔP, psi	Coil Metallurgy	Type of Heater
Crude	10,000	200 min	150	5 Cr or 9 Cr	Vertical Tube Box Cabin or V.C.
Vacuum	8,000	250 min	75	5 Cr or 9 Cr	Vertical Tube Box Cabin or V.C.
Viebreaking	7,000-8,000	350 min (5-6 fps cold oil)	250-300 clean	9 Cr	Cabin with brick centerwall
Coking	9,000	400 min (6 fps cold oil)	300 clean	9 Cr	Cabin with brick centerwall or double fired horizontal tube
Semi-Regn. Platformer	10,000	40-50	7	2-1/4 Cr	V.C. cabin, wicket
CCR Platformer	10,000 SFU 15,000 DFU	23-35	3 per cell	9 Cr	Single Fired U-tube Double Fired U-tube
Reboiler	10,000	150-300	50	C.S.	V.C.
Hot Oil	10,000	400-600	85	C.S.	V.C.
Naphtha Hydrotreater (max. 15 mils/yr)	10,000	70-180	50	9 Cr	V.C.
Naphtha Hydrotreater (with cracked stock)	10,000	70-180	50	347	V.C.
Kerosene Hydrotreater	10,000	150-250	50	347H SS	V.C.
Diesel Hydrotreater	10,000	150-250	50	347H SS	V.C. or double fired vertical tube
Hydrocracker Gas Only	10,000 - 13,000	50-90	30-50	347H SS	double fired vertical tube
Hydrocracker Gas&Liquid	15,000	100-300	50-80	347H SS	double fired vertical tube

Figura 3.15: Criterios de UOP para Mass Velocity lb/s.ft²



Gráfica 3.1: Tendencia de velocidad másica de un Horno de Destilación a Vacío, donde se observa un cambio notable en el criterio de control a partir de enero del año 2011, luego de realizado un Decoking y observar alta presencia de coque en los tubos.

3.2.2.- Monitorear Temperatura de Metal de Piel de Tubos (Skin Points). Ver Gráfica 3.2

Objetivo: Evitar rotura de los tubos con la consecuente fuga de producto e incendio.

La temperatura de piel de tubo es función del coeficiente de transferencia de calor en el lado proceso, del espesor de la película de coque, del espesor del tubo del horno y del flux de calor en la zona radiante del horno. Uno de los principales factores de aumento de la temperatura de piel de tubos es la formación de la película de coque.

El depósito de coque produce deficiencias en la transmisión de calor, siendo necesario aumentar la liberación en los quemadores para mantener las condiciones previstas de operación, asimismo es notoria la caída de presión a través de los tubos.

El horno deberá entregar el calor necesario (Heat Release) para alcanzar el objetivo térmico solicitado por el proceso (Duty). El Duty requerido no variará sea cual fuese la condición del horno (Ejemplo: Tubos con coque), entonces para cumplir su objetivo, el horno incrementará la cantidad de combustible, cuyo calor entregado será absorbido en gran proporción por la superficie del metal, ocasionando su posible rotura por sobrepasar sus límites de elasticidad. Ver *figura 3.16*.



Figura 3.16: Tubo de la Zona Radiante que supero su Límite de Elasticidad

Cuando alguna de las temperaturas de piel de tubos está cercana a superar el valor máximo de diseño del metal, se debe programar un proceso de Spalling y/o Decoquizado o un cambio de tubos, según lo requiera el caso.

Durante el Proceso de Spalling (Astillamiento) se hace circular vapor a través de los tubos del horno. El proceso consiste en variar los flujos de vapor, ocasionando la contracción del coque adherido a los tubos cuando se incrementa la tasa de flujo de vapor, debido al enfriamiento, que origina que los depósitos de coque se agrieten, astillen y sean removidos.

Durante el Proceso de Decoquizado, se hace circular aire (oxígeno) y vapor a través de los tubos, originando así la quema del coque.

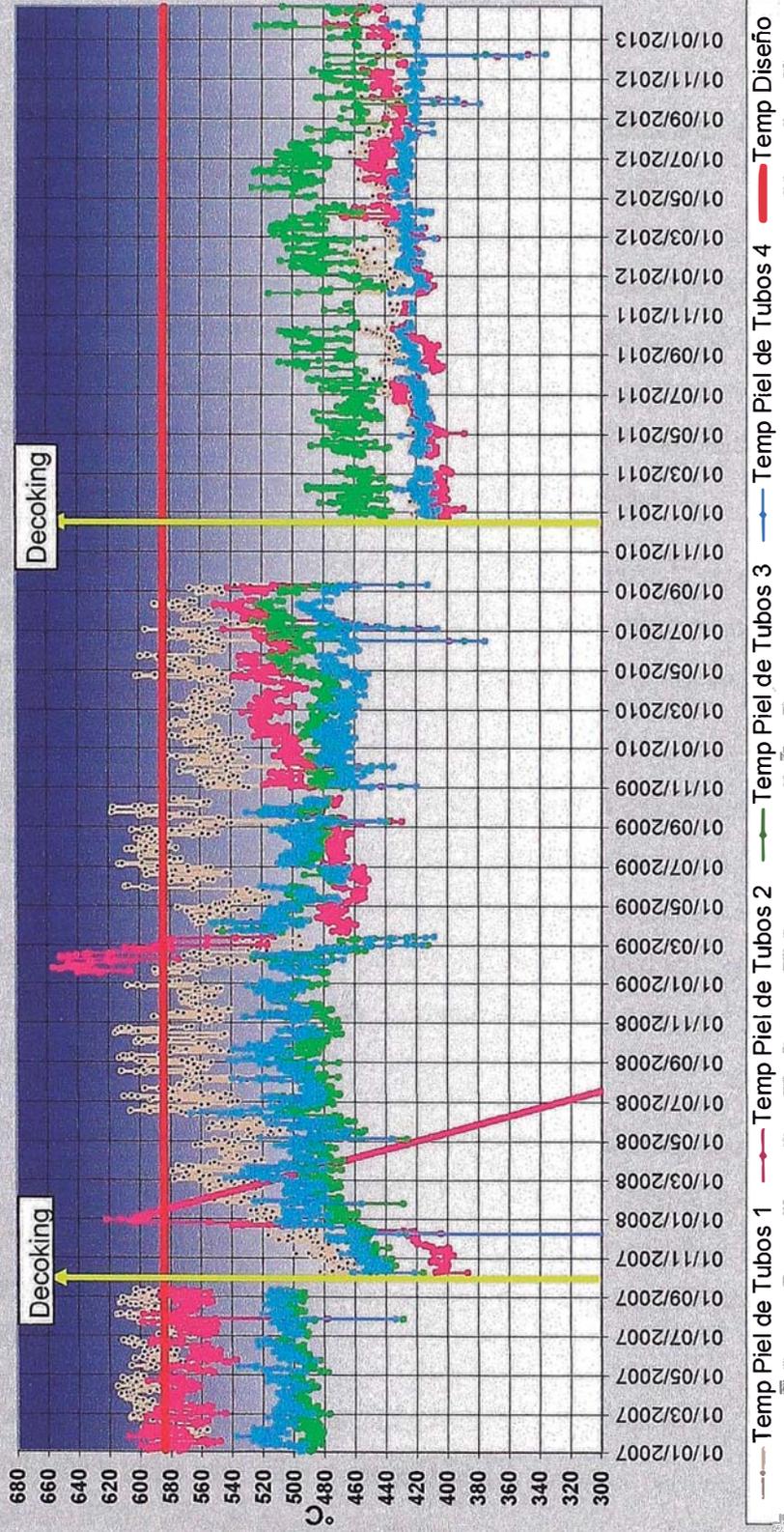
Es aconsejable remover la mayor cantidad posible de coque de los tubos del horno mediante Spalling, antes de remover el coque restante por combustión.

Luego de estas operaciones se observará notablemente el descenso de la temperatura de piel de tubos. Cabe resaltar que altas temperaturas de piel de tubos impiden alcanzar los Dutys requeridos por el proceso, ya que el calor entregado por el horno, debe ser controlado, de tal manera que no se incrementen las temperaturas de piel de tubos hasta su valor límite, ello durante el periodo de tiempo que se decida realizar una Parada de Planta para realizar el mantenimiento.

Es necesario que el Departamento de Inspección lleve una rutina de monitoreo de temperaturas de piel de tubos mediante pirómetro óptico, independiente al valor que puedan medir las termocuplas, ya que podrían estar midiendo valores erróneos.

La *gráfica 3.2* muestra un ejemplo del monitoreo de temperaturas de piel de tubos medidas mediante termocuplas ubicadas estratégicamente en la pared de los tubos de un horno de Destilación a Vacío.

Temperatura de Piel de Tubos en un Horno de Vacío



Gráfica 3.2: Monitoreo de Temperatura de Piel de Tubos

3.2.3.- Monitorear Tiro en Techo de Zona de Radiación (Ver Gráfica 3.3) y Exceso de Oxígeno en la Combustión (Ver Gráfica 3.4)

Objetivo: Evitar que un tiraje inadecuado produzca llamas de gran longitud que incidan en tubos de la zona convectiva ocasionando puntos calientes con la consecuente formación de coque, evitar derrames de aceite combustible, evitar fugas de gases de combustión a la atmósfera en lugares cercanos al operador y lograr una correcta regulación del exceso de oxígeno para la combustión, ya que ambas variables, tiro y exceso de oxígeno, guardan estrecha relación.

Los fabricantes de hornos (Ejemplo: ATEPISA y otros), recomiendan llevar un control del tiro en el techo de radiación entre -3 y -5 mmca, esto asegura el tiro de diseño en la base del horno (aproximadamente entre -15 y -18 mmca), que influye en la forma y estabilidad de las llamas.

El control del tiro en dicho valor se logra con el movimiento del dámper de la chimenea para hornos de tiro natural o con el movimiento del dámper del extractor de humos hacia el precalentador en hornos de tiro forzado. Cabe resaltar que a medida que se ajusta el exceso de oxígeno para la combustión mediante el movimiento de las persianas de ingreso de aire a los quemadores, debe ajustarse el movimiento del dámper.

A fin de dosificar adecuadamente el aire necesario para la combustión, el horno debe contar con un analizador de oxígeno en la zona de choque (al finalizar la zona radiante), se localiza allí con el objetivo de medir la cantidad exacta de oxígeno añadido en exceso para la combustión, que no esté influenciado por el ingreso de aire parásito de la caja de convección.

El valor de exceso de oxígeno recomendado depende del combustible que se esté quemando, para gases este valor suele estar entre 3 a 4% y para aceite entre 4 a 5% lo que equivale a 20 - 25% de exceso de aire.

Ver en la *figura 3.17* los pasos a seguir para lograr un buen control de ambas variables (tiro y oxígeno). El movimiento del dámper por parte del panelista (personal encargado del monitoreo de variables de operación, ubicado en la sala de control) y el movimiento de las persianas de ingreso de aire a los quemadores del horno por parte del operador de campo, deben hacerse en mutua coordinación hasta lograr los objetivos.

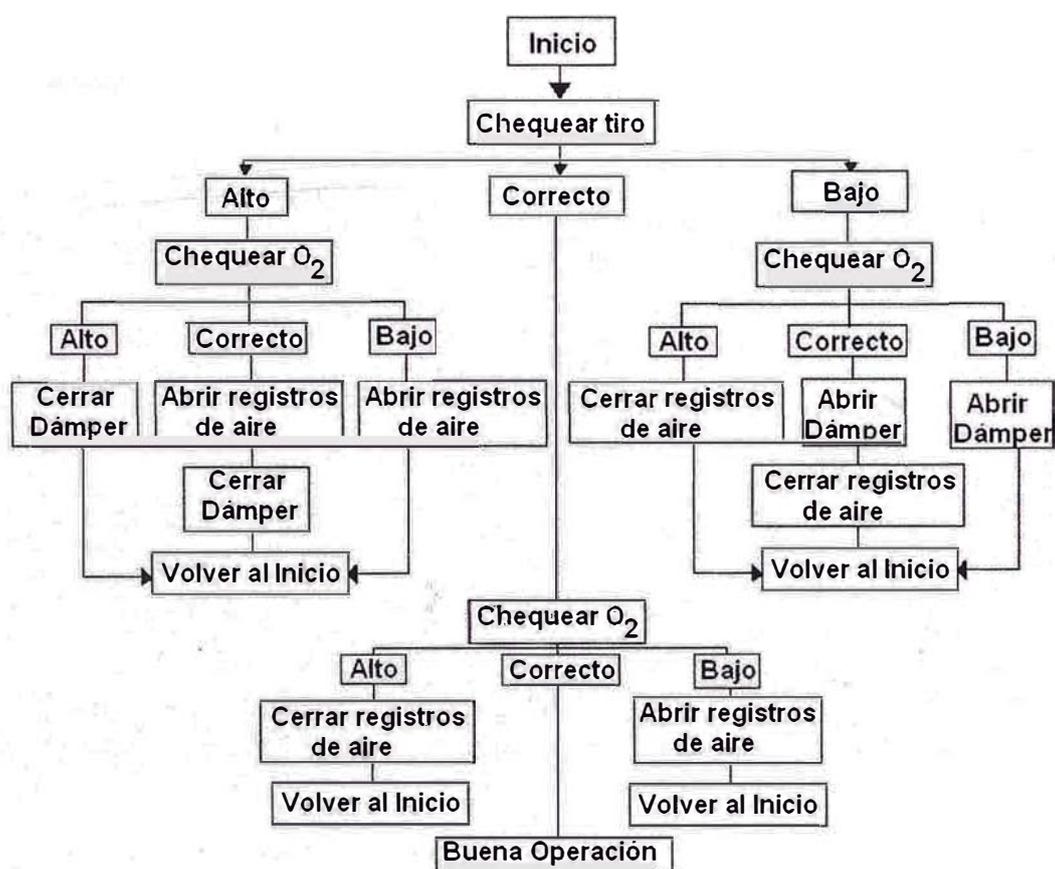


Figura 3.17: Pasos recomendados para la regular el tiraje y el exceso de Oxígeno

Es recomendable llevar una frecuencia de calibración de analizadores de oxígeno de dos veces al mes cuando se quema aceite combustible y una vez al mes cuando se quema gas combustible.

Es importante conocer al detalle el diseño del quemador, ya que según su fabricación y modelo tiene una forma de operación determinada. Por ejemplo, en el quemador de bajo NO_x , modelo PLNC-12RM de fabricación John Zink de tres persianas de ingreso de aire (Ver **figura 3.18**), se debe controlar el ingreso de aire para la combustión de la siguiente manera:

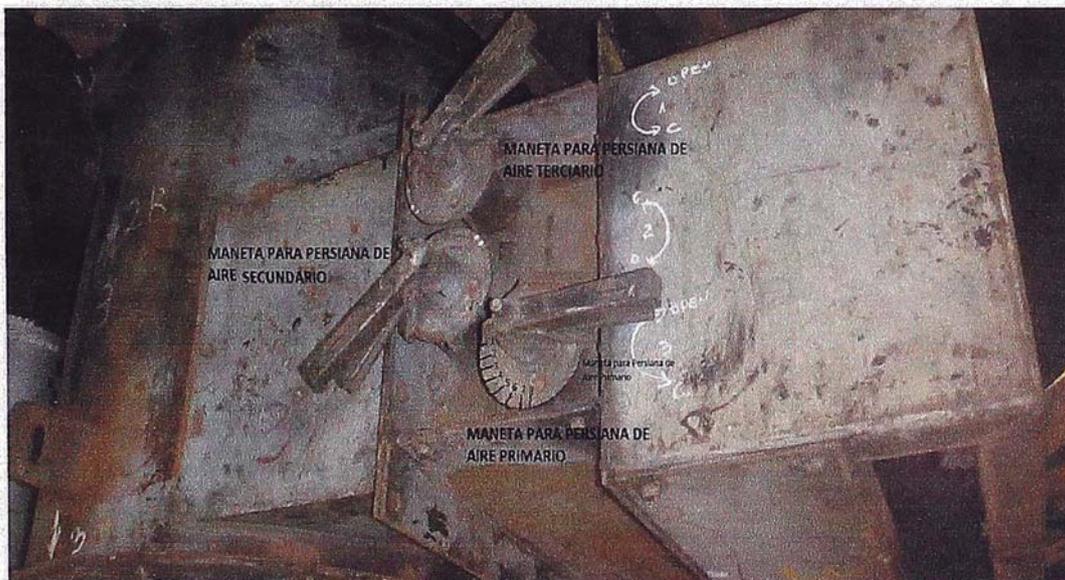


Figura 3.18: Quemador de fabricación John Zink

Cuando se queme aceite combustible, la persiana de ingreso de aire primario (llamada así porque es aquella que admite el ingreso de aire para la combustión del aceite), cuya boquilla está ubicada en la parte central del quemador, debe situarse en la posición número 8 (Cada persiana viene numerada del número 1 al 8, a un mayor número le corresponde una mayor apertura).

La persiana de aire secundario se usará como complemento para completar la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión del aceite, y será ésta quien regule el exceso de aire que deberá situarse entre un 4 a 5% que corresponde a un 20 a 25% de exceso de aire.

Cuando se queme gas combustible, la persiana de ingreso de aire primario debe situarse en la posición número 2. Mientras que la persiana de aire secundario (Llamada así porque admiten el ingreso de aire a la corana del quemador donde se encuentran situadas las boquillas de gas) regulará el exceso de oxígeno para la combustión.

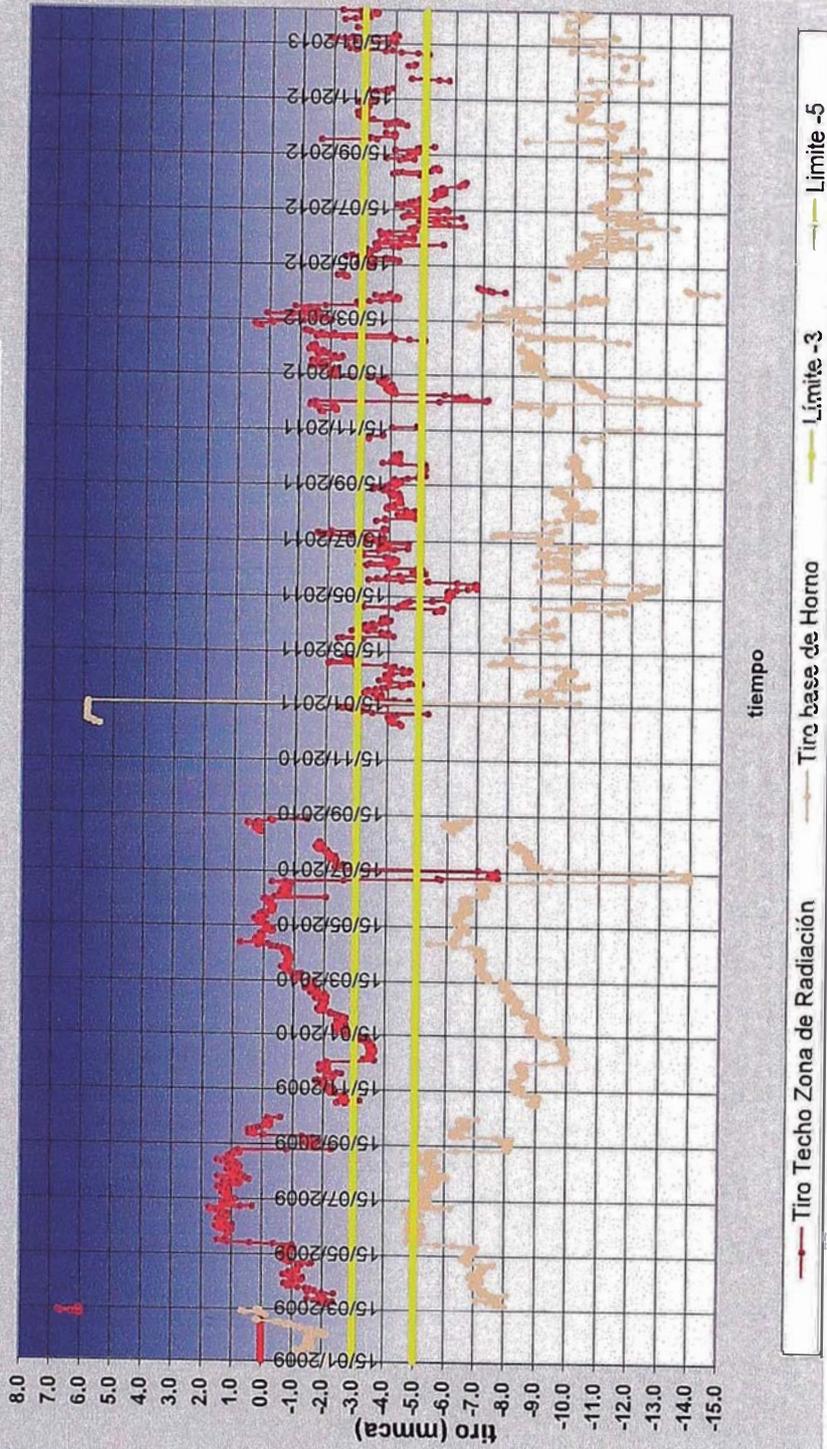
La persiana de ingreso de aire terciario (quemador de bajo NOx) deberá ser regulada junto con la persiana de aire secundario para el control del exceso de oxígeno. Es decir ambas deben de estar siempre en la misma posición.

En adición a ello, si un quemador del horno de proceso, sale fuera de servicio, se deberán cerrar todas sus persianas de ingreso de aire, ya que no hay combustión en dicho quemador (aire parásito).

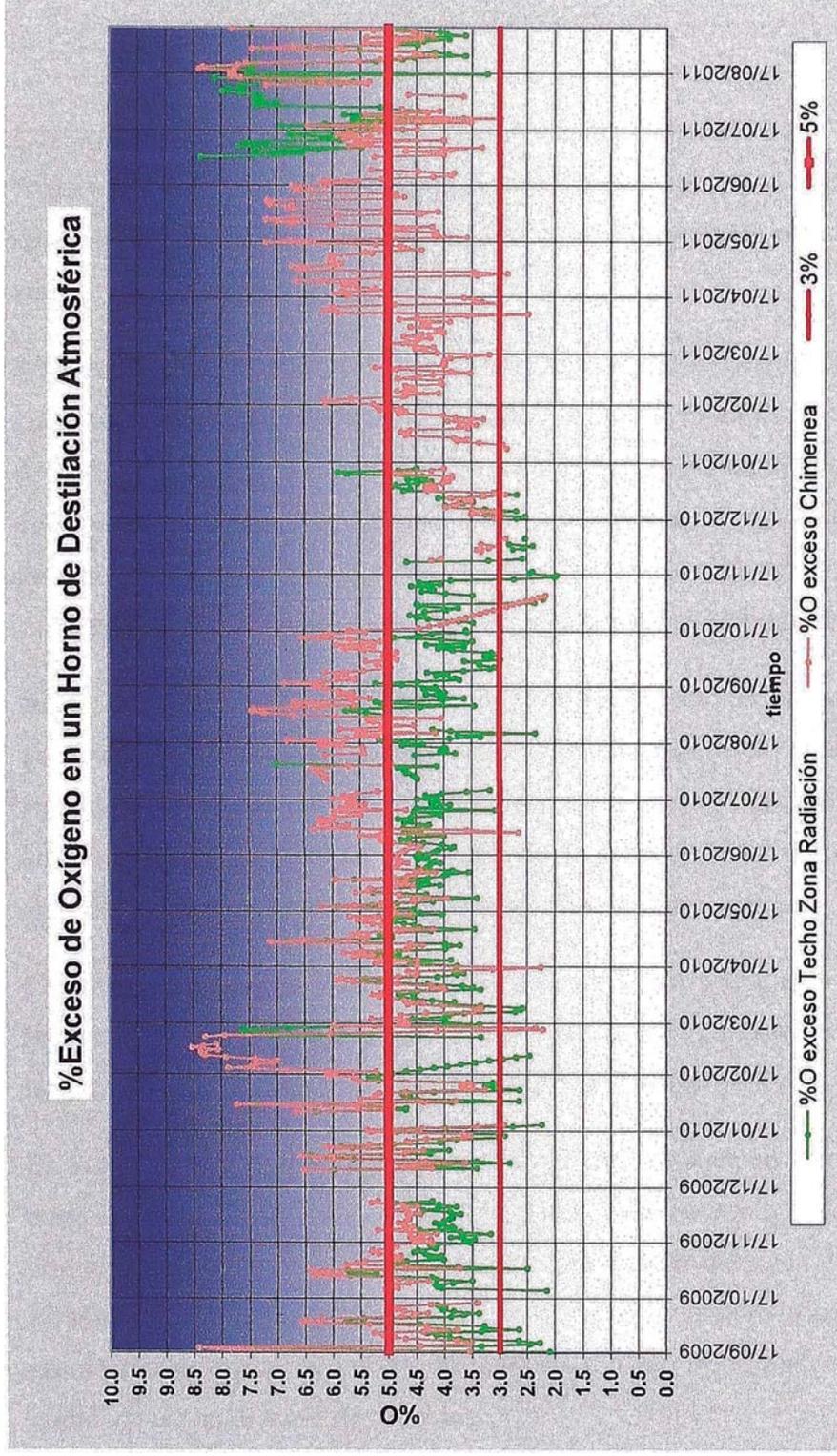
Sólo las persianas de aire deben admitir ingreso de aire al quemador, si se observa algún otro agujero en la base del horno o en el quemador, agujero por algún soplador retirado por mantenimiento en la zona convectiva, agujero en las paredes del horno donde ingresa la línea de la zona convectiva a la radiante ó por donde sale la línea de la zona radiante, entre otros, el operador de campo deberá coordinar con su supervisor inmediato para el mantenimiento respectivo, ya que otros agujeros son también fuentes de ingreso de aire parásito en el horno que causa mayor consumo de combustible y menor eficiencia en el horno.

Ver en las *Gráficas 3.3 y 3.4* el monitoreo de las tendencias que deben realizarse en un horno de proceso para variables de tiro y exceso de oxígeno.

Control de Presión en un Horno de Vacío



Gráfica 3.3: Control de Tiro en el techo de Radiación de un Horno



Gráfica 3.4: Control de Exceso de Oxígeno para la Combustión, en adición al analizador de oxígeno ubicado en la zona del techo de radiación, se tiene otro en la chimenea para medir ingreso de aire parásito en la zona convectiva.

3.2.4.- Monitorear el Ensuciamiento de la Zona Convectiva

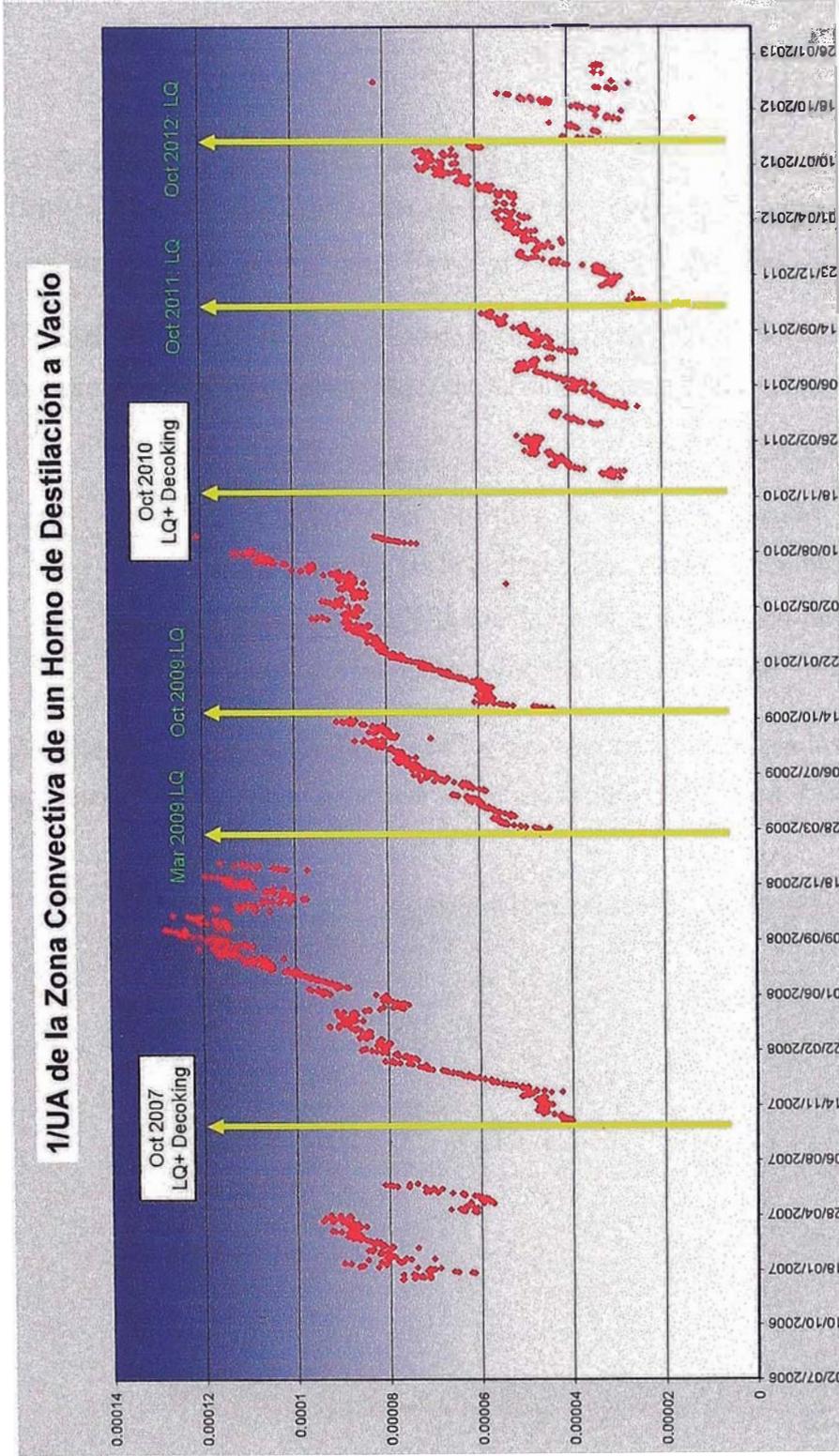
Objetivo: Controlar depósitos de inquemados en la zona convectiva generados por la combustión incompleta, llevando un monitoreo del factor de ensuciamiento de dicha zona.

El primer factor a monitorear será el cumplimiento de la frecuencia de deshollinados establecida. Es recomendable que cada Refinería establezca una frecuencia de deshollinados según el número de sopladores instalados en el horno de proceso. Es decir, empezar con un deshollinado diario e ir observando cómo se comporta el factor de ensuciamiento en el tiempo, aumentar la frecuencia si es necesario con el objetivo de prolongar el tiempo en el cual se mantenga constante dicho factor.

Según el aceite combustible utilizado, el ensuciamiento severo será inevitable, por ejemplo esto ocurre en hornos que queman residuales combustibles de alta viscosidad. Para ello, se debe determinar el momento adecuado para realizar un lavado químico externo de los tubos de la zona convectiva con el objetivo de recuperar la eficiencia de transferencia de calor de dicha zona.

El momento adecuado para el lavado de la zona convectiva será aquel en el que el lucro cesante de la Unidad al estar fuera de servicio más el coste por la realización del lavado químico sea menor a la pérdida de eficiencia del horno.

Es recomendable hacer un seguimiento diario al comportamiento del factor de ensuciamiento de la zona convectiva, tanto para determinar la eficiencia de los deshollinados como para determinar el momento adecuado para la realización de un lavado químico. La *gráfica 3.5*, muestra el comportamiento del factor de ensuciamiento luego de un lavado químico y luego de la realización de un lavado químico más un proceso de decoking.



Gráfica 3.5: Monitoreo en el tiempo del factor de ensuciamiento de un Horno de Vacío, la gráfica muestra el descenso de dicho factor después de un lavado químico de la zona conectiva y luego de un lavado químico más decoking.

3.2.5.- Monitorear estado de quemadores

Objetivo: Lograr una combustión completa con el exceso de oxígeno requerido, sin incidencia de llama en los tubos. Para ello se deberán ejecutar las siguientes acciones:

1.- Comprobar que todos los elementos del quemador estén correctamente instalados de acuerdo con el plano de diseño y recomendaciones del fabricante.

- Respetar la distancia entre las conexiones de FO/HS y el fondo del quemador, con el objetivo de evitar problemas de derrames y coquizaciones en las boquillas de las lanzas de combustible.
- Respetar ángulos y distancias para la instalación de las boquillas de combustibles indicadas en el plano del fabricante.

2.- Comprobar con un nivelador que los quemadores están montados en una posición perfectamente horizontal o vertical según sea el caso. *Ver figura 3.19.*

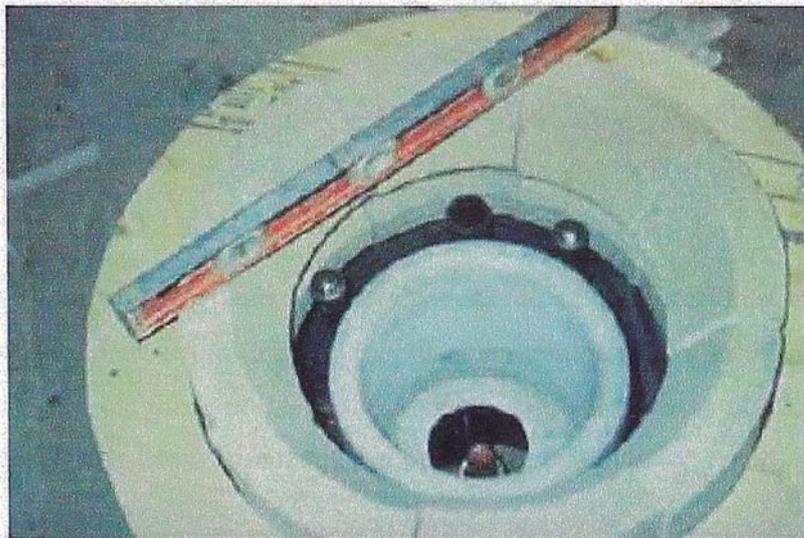


Figura 3.19: Quemador instalado en una posición perfectamente horizontal.

3.- Comprobar que los elementos móviles de las persianas de ingreso de aire a los quemadores se operan con facilidad, en caso contrario suavizar engrasándolas.

4.- Sustituir boquillas en mal estado. La vida de las boquillas de gas y de fuel oil, dependerá principalmente de la calidad del combustible. Las boquillas podrían durar varios años si se usa combustible limpio o se podrían erosionar rápidamente con combustible corrosivo. Una inspección visual de la forma de la llama, indicará si se ha producido erosión o taponamiento. La sustitución de las boquillas en mal estado restablecerá la correcta forma de la llama.

5.- Las muflas deben ser instaladas usando morteros que soporten altas temperaturas (los morteros son utilizados para unir la mufla), ya que si estos fallan, la llama podría chocar contra el piso del horno, ocasionándole deformaciones que a la larga traen como consecuencia la mala instalación de quemadores (No quedan en una posición perfectamente horizontal).

6.- No sobrepasar la liberación máxima de cada quemador, ya que esto genera disturbios en la forma de llama y combustión incompleta, ya que cada quemador está diseñado para admitir cierta cantidad de aire. Los gráficos que muestran el calor entregado según la presión del combustible se encuentran adjuntos a la hoja de datos de los quemadores entregada por el fabricante.

7.- El aceite combustible no deberá trabajar por debajo de la presión mínima indicada por el fabricante para evitar derrame y ensuciamientos innecesarios. Cuando la demanda de calor exigida por el proceso disminuya, es aconsejable trabajar con menos quemadores de posición intercalada a mayor liberación.

8.- Para asegurar una correcta quema de aceite combustible, asegurar que la presión del vapor de atomización sea superior a la del aceite para cualquier liberación, según valor recomendado por el fabricante (superior en $2.1\text{Kg/cm}^2\text{g}$ aproximadamente),

esto asegura un adecuado pulverizado del aceite. Viscosidades más bajas de combustible requerirán presiones de atomización más bajas.

9.- Comprobar que el circuito de vapor de atomización esté libre de condensado. El vapor deberá ser seco. Dado que el agua tiene menos energía que el vapor, la atomización con vapor húmedo no es tan efectiva como un vapor seco. Esta menor energía hará que el tamaño de las gotas sea mayor, y que algunas gotas de agua cubiertas de combustible, se dispersen por la zona de combustión, llamadas comúnmente luciérnagas, ver *figura 3.20*. Estas gotas de mayor tamaño, y estas gotas de agua, son quemadas más lentamente y se les puede ver frecuentemente flotando en la zona radiante, lo que es una fuente de ceniza y hollín que se acumula en los tubos de la zona radiante y convectiva.

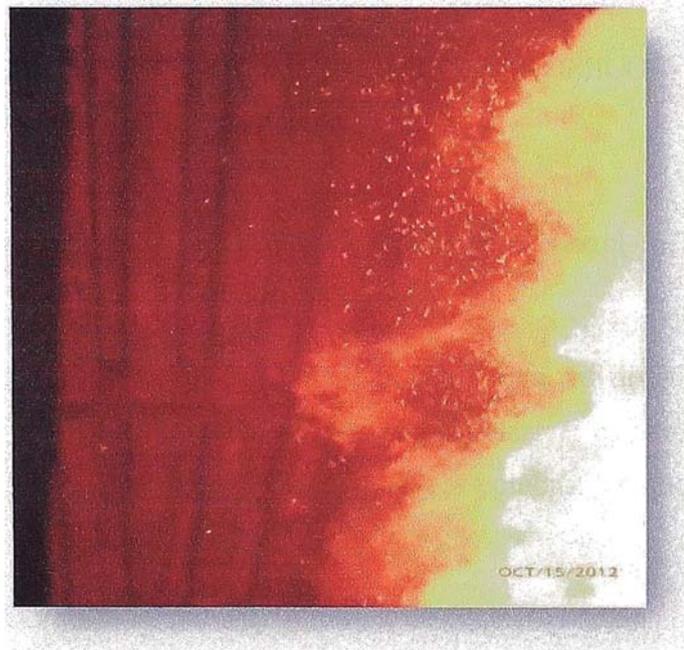


Figura 3.20: Grandes gotas de aceite que no se queman por completo por alta viscosidad del aceite / Gotas de agua cubiertas de combustible por vapor de atomización húmedo.

10.- La temperatura del aceite combustible en la punta del quemador debe ser tal que su viscosidad se sitúe entre 200 y 250SSU. La viscosidad es una medida de la resistencia del combustible a la dispersión. Conforme se incrementa, disminuye la calidad de la atomización y de la combustión. Para lograr la viscosidad requerida en la punta de la boquilla es necesario aislar térmicamente las líneas de aceite y vapor hasta las zonas más cercanas al quemador para evitar pérdidas de calor que afecten la viscosidad requerida.

11.- Asegurarse que las boquillas de los pilotos reciban un mantenimiento periódico, ya que es necesario que se mantengan libre de residuos. Asimismo, regular el ingreso de aire al piloto, ya que si su persiana de ingreso de aire está desajustada, el piloto podría apagarse o no encenderse.

3.3.- INDICADOR DE EFICIENCIA, AHORRO ECONÓMICO Y REDUCCIÓN DE EMISIONES DE UN HORNO DE REFINERÍA

Este indicador será consecuencia de haber tenido bajo control todos los aspectos anteriormente descritos.

Para comparar la operación actual de un horno contra su diseño, es necesario comparar ambas eficiencias. Con el objetivo de alcanzar el calor requerido por el proceso, una operación ineficiente consumirá mayor combustible que lo indicado en el diseño para el mismo Duty requerido.

En la *tabla 3.1*, se detalla un periodo semestral de operación de un horno de proceso, en el cual, la eficiencia ha ido disminuyendo, ya sea por aumento de la temperatura de chimenea o por incremento del exceso de oxígeno.

Cabe resaltar que la eficiencia de un Horno está íntimamente relacionada con la temperatura de chimenea y el exceso de oxígeno en la combustión, ambas variables determinan el rendimiento de un horno, ver *gráfica 3.6* para observar tendencia.

La tabla 1 muestra la cantidad de calor extra a ser entregada por el horno al perder eficiencia, es un claro indicador de la operación eficiente ó ineficiente de un Horno que deberá ser monitoreado diariamente.

El cálculo se basa en la comparación del calor real entregado contra el calor que se entregaría si se trabajará a la eficiencia de diseño, para cada Duty promedio del mes analizado:

$$\% \text{Eficiencia} = \text{Duty (Calor Absorbido)} / \text{Heat Release (Calor Entregado)} \times 100$$

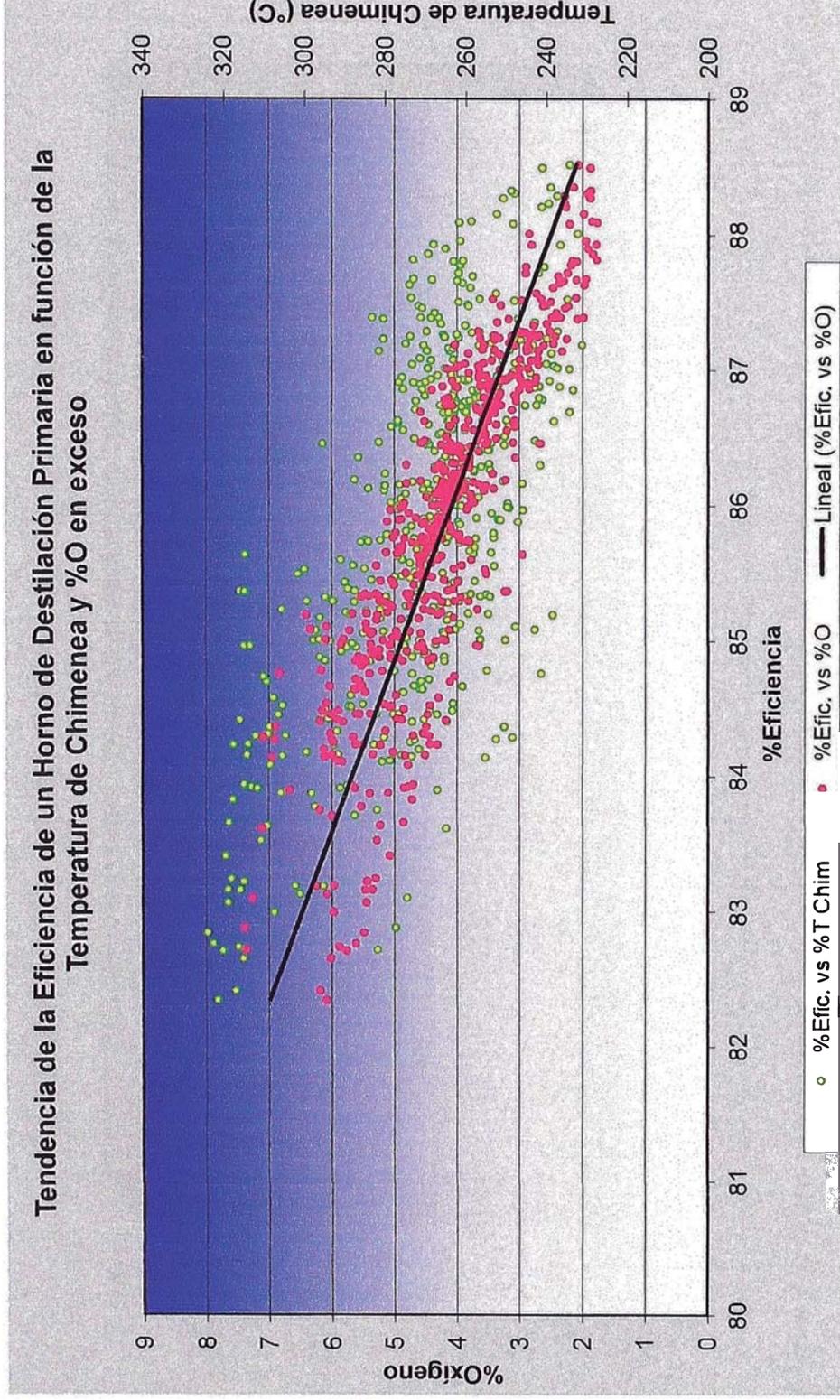
La diferencia entre ambos calores entregados, dividido entre el poder calorífico del combustible, indicará el consumo extra de combustible que se tuvo que quemar en el horno para alcanzar el Duty solicitado, al no operar eficientemente. Sabiendo el costo de un barril de combustible se puede obtener la pérdida económica total generada, por operar en condiciones que alteran el buen funcionamiento del horno. Ver *gráfica 3.7*. Asimismo al multiplicar el factor de emisión de CO₂ por el calor extra entregado en el horno, se puede hallar la cantidad de CO₂ emitida por pérdida de eficiencia.

Los datos usados en los cálculos de la tabla 1 son:

- Precio promedio de 1 Barril de Fuel Oil Equivalente de cada mes del año 2012 en US\$/Barril.
- Poder Calorífico de 1Barril de Fuel Oil Equivalente de 6.05MMBtu.
- Factor de emisión promedio de 78.68TonCO₂/GJ

Tabla 3.1: Indicador a ser monitoreado en cada Horno de una Refinería de Petróleo

	Ene-12	Feb-12	Mar-12	Abr-12	May-12	Jun-12	Jul-12
%Eficiencia	74.3%	74.4%	73.8%	71.5%	71.6%	71.3%	69.6%
Duty (MMBtu/h)	11.0	10.9	12.3	11.3	13.0	12.0	11.8
Calor Liberado (MMBtu/h)	14.9	14.7	16.7	15.9	18.1	16.8	16.9
%Eficiencia Estándar	76.6%	76.6%	76.6%	76.6%	76.6%	76.6%	76.6%
Calor Liberado para Efic. Estándar (MMBtu/h)	14.4	14.2	16.1	14.8	16.9	15.7	15.4
Calor entregado por pérdida de eficiencia (MMBtu/h)	0.4416	0.4163	0.6209	1.0494	1.1807	1.1687	1.5482
N° horas de operación	744.0	696.0	744.0	720.0	744.0	720.0	744.0
Calor entregado por pérdida de eficiencia (MMBtu)	328.5	289.7	461.9	755.6	878.4	841.4	1151.9
Calor entregado por pérdida de eficiencia (BFOE)	54.3	47.9	76.4	124.9	145.2	139.1	190.4
US\$/BFOE	88.0	93.7	96.6	93.9	83.5	71.6	75.6
Gasto Extra KUS\$	4.8	4.5	7.4	11.7	12.1	10.0	14.4
Acumulado KUS\$	64.8						
Miles Toneladas de CO ₂ emitidas por pérdida de eficiencia	27.3	24.1	38.3	62.7	72.9	69.8	95.6
Acumulado Miles Ton.CO ₂	390.8						



Gráfica 3. 6: A mayor Temperatura de Chimenea y %Oxígeno en Exceso, menor Eficiencia del Horno de Proceso

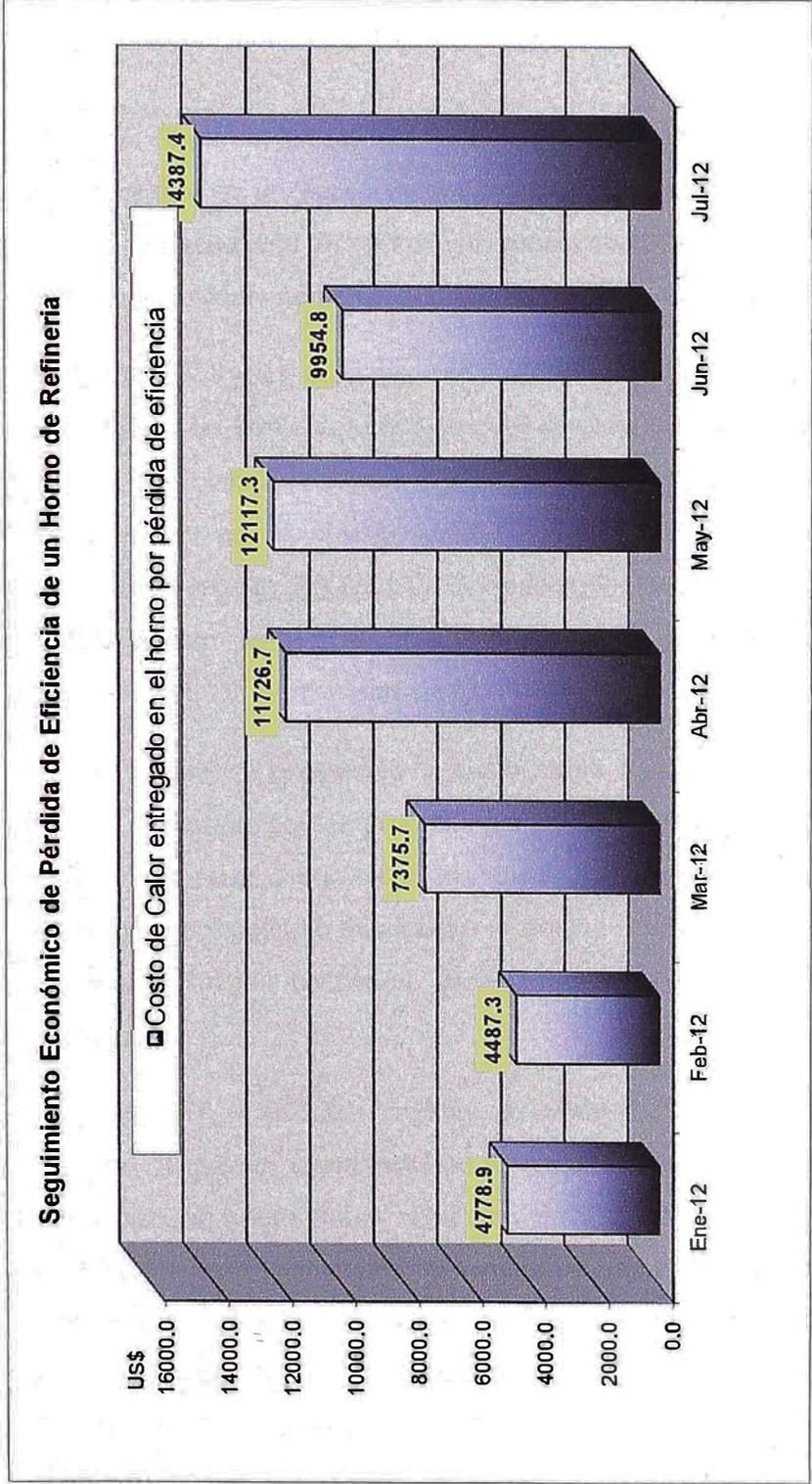


Gráfico 3.7: Muestra la evolución de la pérdida económica generada al operar un Horno con menor eficiencia (Periodo Semestral)

Asimismo como se muestra en la *tabla 3.2* y en la *tabla 3.3*, basadas en datos experimentales de un horno de refinería, un incremento innecesario de 1% en el exceso de oxígeno para la combustión, genera una pérdida económica equivalente a la generada por el incremento de la temperatura de chimenea en 10°C.

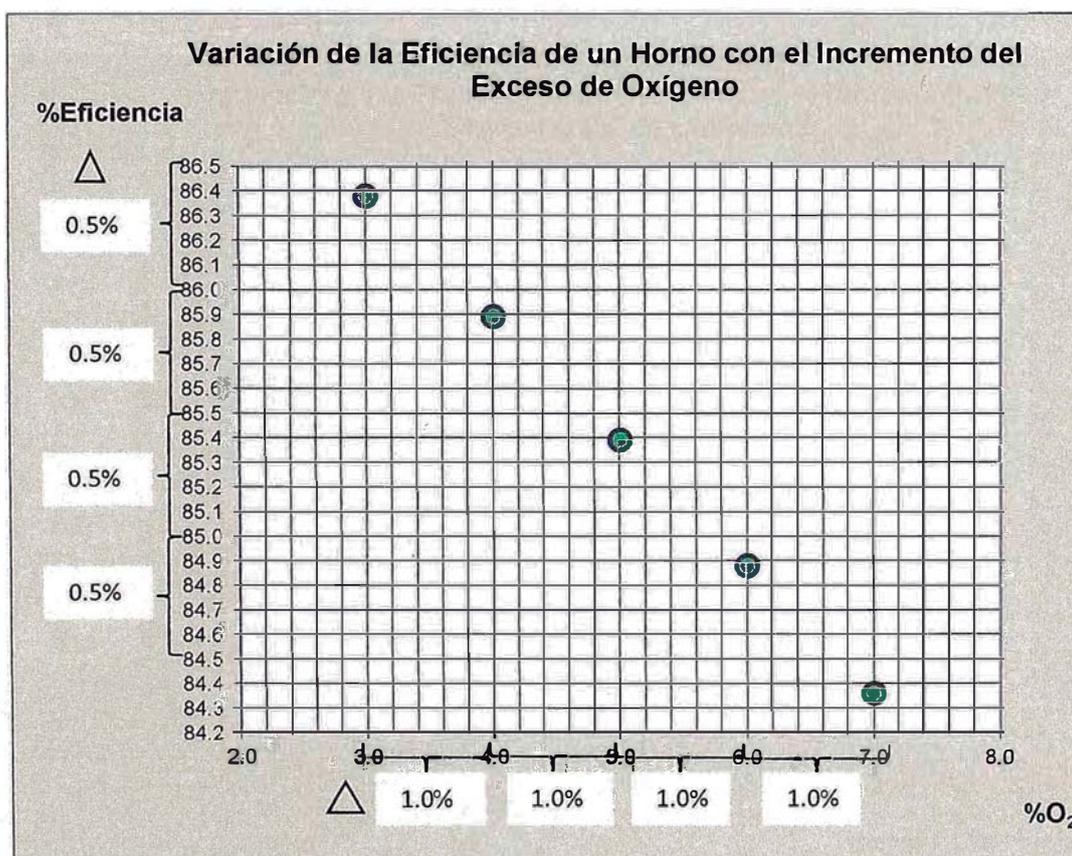
Las *Gráficas 3.8 y 3.9* muestran que una variación de 1% en el exceso de Oxígeno o una variación de 10°C en la temperatura de chimenea, representan una variación de 0.5% en la eficiencia. Es decir que por un incremento anual de 1% en el exceso de Oxígeno o por un incremento anual de 10°C en la Temperatura de Chimenea se perdería en promedio 55KUS\$/año. Considerando: Precio promedio de 1 Barril de Fuel Oil Equivalente del mes de marzo 2013 en 90.1US\$/Barril, Poder Calorífico de 1Barril de Fuel Oil Equivalente de 6.05MMBtu.

La tabla 2, valoriza la cantidad de combustible consumida en un horno para alcanzar el calor requerido por el proceso; para luego comparar dicha valoración con la resultante al operar el horno con incrementos de 1% en el exceso de oxígeno (menos eficiente) con el objetivo de alcanzar el mismo calor requerido; mientras que la tabla 3 realiza la misma operación, para incrementos de 10°C en la temperatura de chimenea.

Las tablas 2 y 3 calculan también la cantidad de toneladas de CO₂ emitidas al ambiente, al quemar cierta cantidad de combustible para alcanzar el calor requerido del proceso, un horno menos eficiente deberá consumir más combustible para lograr su objetivo, por lo tanto emitirá mayor cantidad de CO₂ al ambiente. Basta con conocer la cantidad de energía consumida en el horno y multiplicar dicho valor por el factor de emisión de CO₂, cuyas unidades son TonCO₂/GJ, para saber la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera. Para los cálculos mostrados se utilizó el factor de emisión promedio del mes de marzo de 2013 de 78.68TonCO₂/GJ). La política de toda Refinería deberá centrarse en acciones que disminuyan las emisiones de estos gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Tabla 3.2: Eficiencia de un Horno al incrementarse el %O₂.

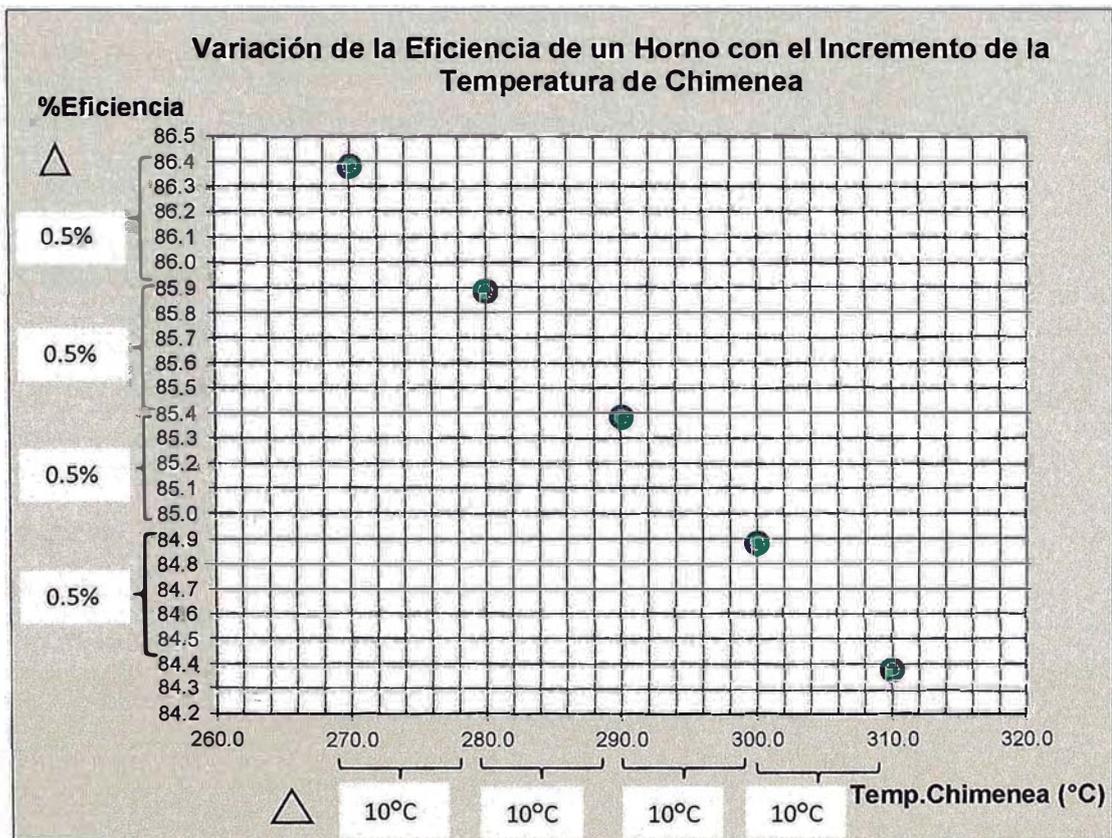
Temperatura de Chimenea (°C)	270	270	270	270	270
%Oxígeno en Exceso	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
%Eficiencia	86.4	85.9	85.4	84.9	84.4
Duty (MMBtu/h)	65	65	65	65	65
Calor Liberado (MMBtu/h)	75.2	75.7	76.1	76.6	77.1
Calor Liberado (GJ/año)	695421	699386	703483	707715	712086
Toneladas de CO ₂ emitidas	54716	55028	55350	55683	56027
Calor Liberado (BFOE/año)	108953	109574	110216	110879	111564
Costo (KUS\$/año)	9893	9949	10008	10068	10130
Costo adicional por Pérdida de Eficiencia (KUS\$/año)		56	58	60	62



Gráfica 3.8: Variación de la Eficiencia de un Horno con el Incremento del Exceso de Oxígeno

Tabla 3.3: Indicador de Eficiencia al incrementarse la Temperatura de Chimenea.

Temperatura de Chimenea (°C)	270	280	290	300	310
%Oxígeno en Exceso	3	3	3	3	3
%Eficiencia	86.4	85.9	85.4	84.9	84.4
Duty (MMBtu/h)	65	65	65	65	65
Calor Liberado (MMBtu/h)	75.2	75.7	76.1	76.6	77.0
Calor Liberado (GJ/año)	695421	699438	703528	707692	711930
Toneladas CO₂ emitidas	54716	55032	55354	55681	56015
Calor Liberado (BFOE/año)	108953	109583	110223	110876	111540
Costo (KUS\$/año)	9893	9950	10008	10068	10128
Costo adicional por Pérdida de Eficiencia (KUS\$/año)		57	58	59	60



Gráfica 3.9: Variación de la Eficiencia de un Horno con el Incremento de la Temperatura de Chimenea

El cálculo de las eficiencias de hornos, basadas en la temperatura de chimenea y porcentaje de exceso de oxígeno, proviene de correlaciones realizadas en corridas de pruebas para varios hornos según el método del API560.

Las tablas de evaluación económica deben llevarse como indicador primordial en toda Refinería, ya que el personal sólo comprenderá la importancia de desarrollar correctamente todos los puntos anteriormente descritos, si conoce la valoración económica de su trabajo.

A continuación se muestra un resumen de las ineficiencias y sus consecuencias:

Ineficiencia	Consecuencia	Costo de la Ineficiencia
Mal estado de Sopladores de Hollín	Ensuciamiento de la Zona Convectiva	Incremento de la Temperatura de Chimenea en 10C = 55KUS\$/año
No cumplir con la frecuencia de deshollinados		
Operar por encima de la liberación máxima de un Quemador		
Inadecuada instalación de Quemadores		
Mal estado de Boquillas de Gas y Aceite		
Mal estado de Muflas y Morteros del Quemador		
Regulación Inadecuada de Vapor de Atomización/Aceite Combustible		
Vapor de Atomización con Humedad		
Alta viscosidad de aceite combustible		
Insuficiente aire para la combustión		
Inadecuada regulación de Tiro y Oxígeno	Exceso de Oxígeno para la Combustión	Incremento del exceso de Oxígeno en 1% = 55KUS\$/año
Entradas de aire parásito		
Escaso mantenimiento a persianas de ingreso de aire a quemadores		

3.4.- CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UN HORNO:

Para operar de forma segura un horno, éste deberá de disponer de Sistemas de Seguridad y Control, compuestos por instrumentos de campo, válvulas de control y de corte, así como de transmisores de presión, caudal y temperatura que envíen los valores de las variables de operación a los Sistemas de Seguridad (PLC) y control (SCD), para regular y asegurar la operación.

La instrumentación debe monitorizar cualquier variable que pueda indicar mal funcionamiento del horno, condiciones anómalas ó una mala operación, que pueden ser causas de una situación potencialmente peligrosa. Los instrumentos asociados a control, deberán ser siempre independientes de los asociados a la seguridad.

El sistema de seguridad deberá estar formado por un conjunto de enclavamientos, que llevan a cabo la paralización parcial o total del horno, cuyos instrumentos tendrán redundancia triple y lógica por votación dos de tres, es decir, si dos de los tres instrumentos instalados fallan, deberá actuar el enclavamiento.

Todos los enclavamientos cuentan con interruptores de by-pass para permitir el mantenimiento de los transmisores de campo, los enclavamientos sólo deben de dejar de funcionar por este motivo, es labor del supervisor identificar salvaguardas que aseguren una correcta operación mientras el by-pass este activado. El periodo de desactivación debe ser lo más corto posible.

Con el fin de reguardar la operación, se recomienda implementar los siguientes enclavamientos listados a continuación, en adición a los identificados por cada Refinería según su situación en particular:

- Para prevenir alta temperatura de metal de tubos, formación de coque, riesgo de rotura del haz tubular e incendio en el horno:

Enclavamiento 1: Muy bajo caudal de fluido por los pasos del horno

Efecto1: Corte de Fuel Oil/ Fuel Gas a quemadores.

- Para proteger el hogar del horno ante eventos de sobrepresión, que causan emisión de humos y/o llamas a través de las mirillas y ventanas de explosión, en algunos casos retroceso de llama:

Enclavamiento 2: Alta presión en el Techo de Radiación

Efecto2: En 0mmca: Apertura de la válvula de control de tiro (dámper)

En (+)5mmca: Corte de Fuel Oil/Fuel Gas a Quemadores

En (+)10mmca: Corte de Fuel Oil/Fuel Gas a Pilotos

- Para proteger al horno ante eventos de menor ó mayor presión en la red de fuel gas a pilotos y/o quemadores que ocasionarían inestabilidad de las llamas, desprendimiento de llamas de los pilotos y/o quemadores, apagado de los mismos, con el consecuente peligro de ingreso de gas al horno que podría ocasionar una explosión durante el reencendido:

Enclavamiento 3: Muy baja y muy alta presión de Fuel Gas a Pilotos

Efecto3: Corte de Fuel Oil/Fuel Gas a Quemadores y Fuel Gas a Pilotos

Enclavamiento 4: Muy baja y muy alta presión de Fuel Gas a Quemadores

Efecto4: Corte de Fuel Gas a Quemadores

- Para proteger al horno ante eventos de aumento de la longitud de llamas que pueden incidir en los tubos y por lo tanto reducir su vida útil; y derrames de aceite combustible:

Enclavamiento 5: Muy baja y muy alta presión de Fuel Oil a Quemadores

Efecto5: Corte de Fuel Oil a Quemadores

- Para proteger al horno ante baja presión diferencial entre vapor de atomización y aceite combustible que podría causar derrame en quemadores, caída de combustible:

Enclavamiento 6: Muy baja presión diferencial Fuel Oil / Vapor de Alta Presión

Efecto6: Corte de Fuel Oil a Quemadores

En adición a ello es recomendable tener:

- **Enclavamiento 7:** Parada de Emergencia (Apagado Total del Horno)

Efecto7: Corte de Fuel Oil a Quemadores, Corte de Fuel Gas a Quemadores y Pilotos.

Es necesario comprobar la verdadera posición de las válvulas de corte (todo/nada) que participan en los enclavamientos arriba descritos, es por ello que deberán tener señales de finales de carrera de posición abierta y cerrada, ya que esto protege ante eventos de fallo de las válvulas en posiciones parcialmente abiertas ó cerradas.

En adición a ello, el horno debe contar con un sistema de alarmas, el cual indicará situaciones potencialmente peligrosas para el personal operativo, para los equipos o para los productos.

Es recomendable que antes de encender un quemador se deba realizar un barrido del horno para desplazar atmósferas explosivas. La operación de barrido debe de realizarse hasta desplazar entre 3 y 5 veces el volumen de la zona radiante del Horno. Tras cierto número de intentos fallidos de encendido (indicados por el fabricante del horno), se debe realizar un nuevo barrido.

La **Figura 3.21**, muestra el esquema típico de instalación para una línea de Fuel Gas Combustible hacia Quemadores y Pilotos.

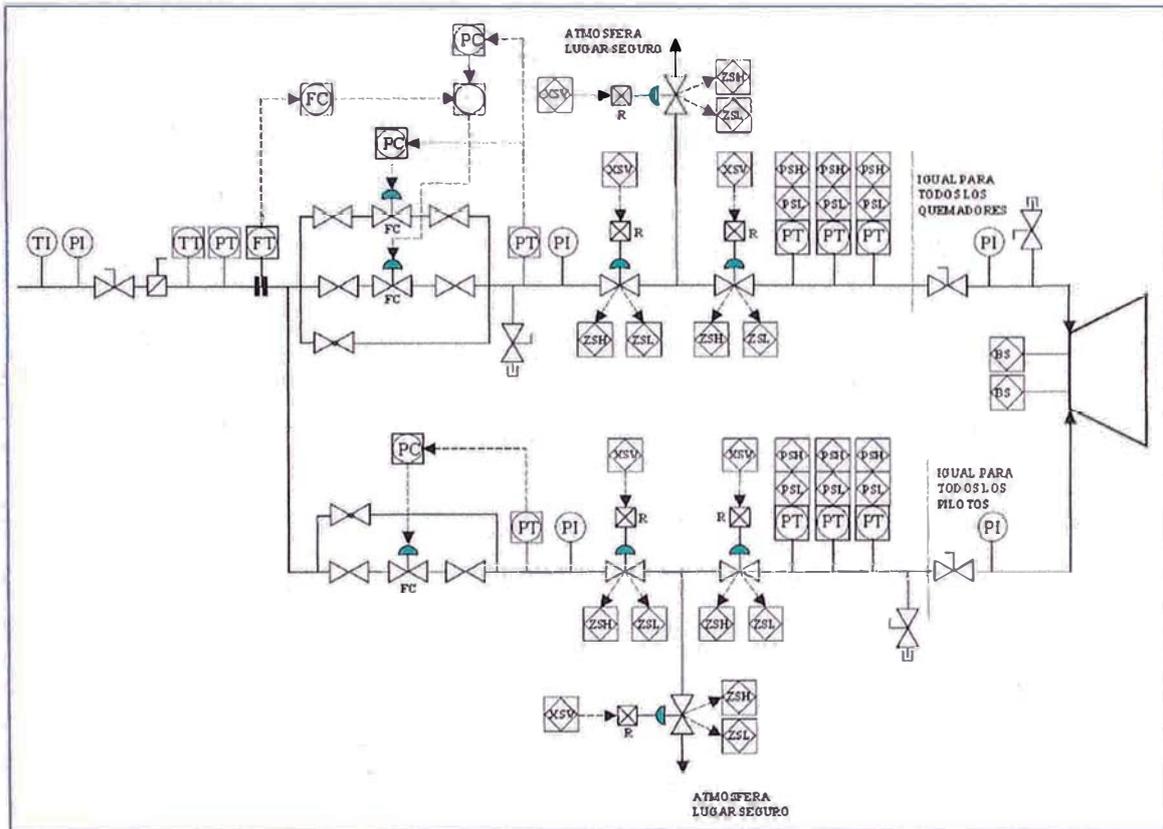


Figura 3.21: Esquema Típico de Línea de Fuel Gas

La **Figura 3.22**, muestra el esquema típico de instalación para una línea de Fuel Oil Combustible hacia Quemadores.

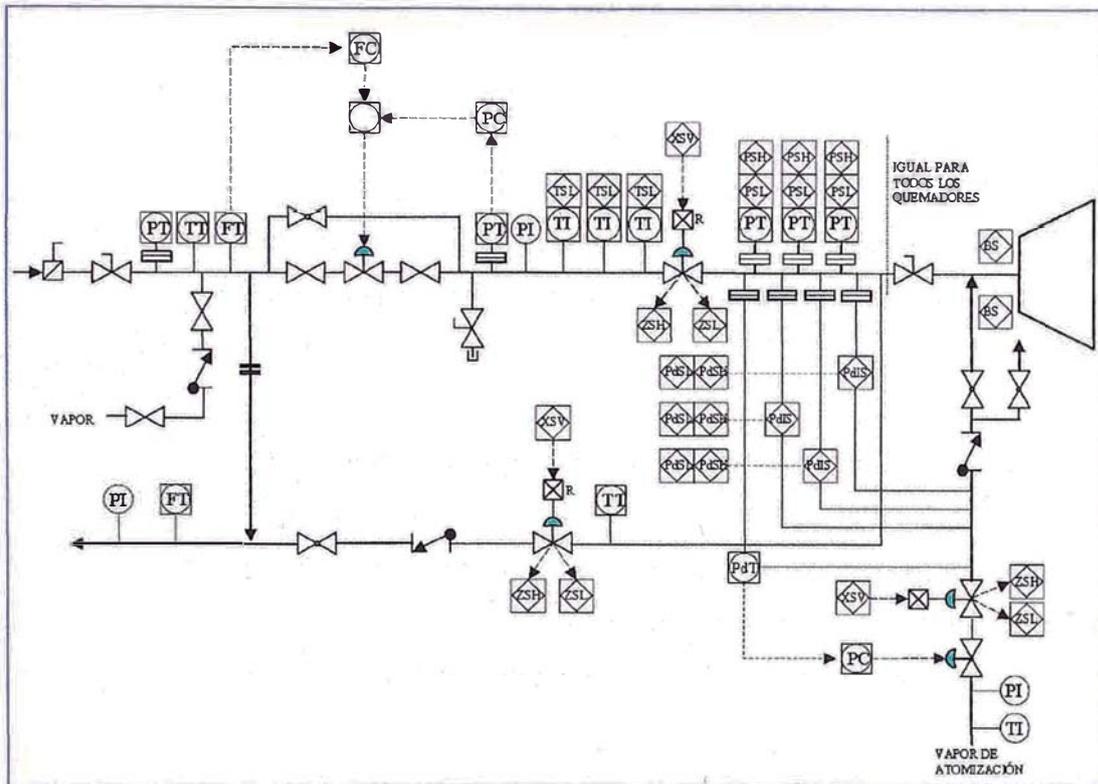


Figura 3.22: Esquema Típico de Línea de Fuel Oil

Además de los instrumentos mostrados en las Gráficas 8 y 9, todo horno deberá estar provisto como mínimo de los siguientes instrumentos:

- Manómetros y Transmisores para medida de tiros.
- Termopares para medida de temperatura de fluido de proceso.
- Termopares para medida de la temperatura de humos.
- Termopares para medida de la temperatura de pared del serpentín (Skin Point)
- Termopares para medida de temperatura de fluido del proceso (Ingreso y Salida de cada paso del horno).
- Placas de orificio y transmisores para medida de caudal de fluido de proceso.

IV.- CONCLUSIONES

1. El gasto por combustible consumido en los Hornos de Proceso en las Refinerías de Petróleo representa aproximadamente el 90% del total de sus costos variables, ello es la fuerza motriz que impulsará el logro de una eficiente operación de estos equipos. Todo horno deberá ser operado dentro de sus condiciones de diseño.
2. Para evitar coquización dentro de los tubos del Horno, ocasionado por un desequilibrio de calor a través de los pasos individuales, se deberán monitorear el flujo de masa por área de superficie transversal en cada paso del Horno y las temperaturas del metal de piel de tubos, esto evitará una posible rotura de los tubos con la consecuente fuga de producto e incendio.
3. Para evitar coquización dentro de los tubos del Horno, ocasionado por incidencia de llama, se deberá operar cada quemador dentro de su curva de liberación de calor, asimismo se deberá realizar un exhaustivo mantenimiento a cada una de las partes del quemador, sean boquillas de combustible, muflas y persianas de ingreso de aire.
4. No se deberá exceder la máxima presión de los combustibles indicada en la curva de liberación de los quemadores, el depósito de coque produce deficiencias en la transmisión de calor, lo que induce al operador a incrementar las presiones de los combustibles para alcanzar el calor requerido del horno. Normalmente esta es la causa por la que muchas refinerías exigen los quemadores operándolos fuera de sus condiciones de diseño ocasionando deterioro de boquillas e incidencia de llama en los tubos.

5. Una adecuada inspección del montaje de cada una de las partes del quemador, asegurará la correcta operación de éste. Cada quemador deberá ser instalado de acuerdo al plano de su fabricante.
6. El control del tiro en la zona de choque del horno evitará presiones positivas, derrames de combustibles, llamas largas que incidan en los tubos de la zona de choque y fuga de gases de combustión a la atmósfera.
7. El tiro del horno así como el exceso de oxígeno para la combustión deberán ser regulados coordinadamente. Un adecuado control del exceso de oxígeno entre 3 a 5%, permitirá una mayor eficiencia del horno.
8. El monitoreo del factor de ensuciamiento de la zona convectiva permitirá evaluar la eficiencia de los deshollinados con vapor y evaluar la posibilidad de una limpieza química de la zona convectiva por deposición de inquemados, que causará un incremento gradual de la temperatura de chimenea por pérdidas de calor al ambiente debido a una mala transferencia de calor en dicha zona.
9. La presión de vapor de atomización deberá ser superior, en el valor recomendado por el fabricante ($2.1\text{Kg/cm}^2\text{g}$), a la presión del aceite combustible, para asegurar un adecuado pulverizado del aceite, en adición el vapor de atomización deberá estar libre de condensado. Como regla general, la temperatura del aceite combustible en la punta del quemador debe ser tal que su viscosidad se sitúe entre 200 y 250SSU. La viscosidad es una medida de la resistencia del combustible a la dispersión.
10. El indicador de eficiencia de un horno de refinería, muestra la cantidad de calor extra entregada por un horno al perder eficiencia, es decir compara el calor real entregado con el calor que se entregaría si se trabajase a las

condiciones de diseño, contabilizándolo en barriles de combustible y en pérdida de miles de dólares al año, asimismo contabiliza las miles de toneladas de CO₂ extras emitidas al ambiente al trabajar ineficientemente.

11. La eficiencia del horno guarda estrecha relación con la temperatura de chimenea y el exceso de oxígeno en la combustión. Un incremento en la temperatura de chimenea de 10°C, causa una pérdida de eficiencia de 0.5%, equivalente a la que se generaría si se incrementase el exceso de oxígeno para la combustión en 1%.
12. Todos los efectos que se derivan de una política ordenada de reducción de la intensidad energética son positivos: La factura energética se reduce, los procesos productivos son más eficientes, con las consiguientes ventajas en cuanto a competitividad; y las emisiones contaminantes se reducen con las correspondientes ventajas medioambientales.
13. El Indicador de eficiencia, ahorro económico y reducción de emisiones de un Horno de Refinería nos proporcionan el resultado de la gestión energética, nos permite compararnos con nuestros valores históricos o con valores de otras refinerías y nos facilita la evolución de los ahorros conseguidos.
14. Es responsabilidad de la alta dirección, estimular, sensibilizar, formar e involucrar a toda la organización para alcanzar la máxima eficiencia energética en todos los Hornos de las Refinerías; en adición a ello, ya que sólo podemos mejorar aquello que podemos medir, es necesario que la Refinería invierta en instrumentación y sistemas de control y seguridad, ya que esto garantiza la operación eficiente y segura de un Horno.

V.- RECOMENDACIONES

1. Para evitar trabajar por debajo del flujo de masa por área de superficie transversal en cada paso del Horno, es recomendable seguir los criterios de velocidad mínima de UOP, Exxon, ATEPISA, entre otros especialistas.
2. Es recomendable que el operador de campo realice una inspección cada turno del estado de las llamas del horno, cualquier observación anómala deberá ser comunicada inmediatamente a su supervisor y reportada en un cuaderno de evidencias.
3. Es recomendable realizar un mantenimiento preventivo a todas las partes del quemador, éste mantenimiento deberá tener mayor frecuencia si el combustible utilizado es líquido.
4. Cuando es necesario trabajar con menor cantidad de quemadores, es recomendable encender quemadores intercalados, para lograr una mejor distribución de calor en la cabina del horno.
5. La medición de temperaturas de piel de tubos deberá también tener una frecuencia de medición por parte del departamento de inspección, esta se deberá realizar con pirómetro óptico, ello con el objetivo de contrastar los valores indicados por los instrumentos.
6. Si las altas temperaturas de piel de tubos no permiten alcanzar el calor requerido por el horno, es recomendable sacarlo fuera de servicio y realizar un Spalling y Decoquizado de los tubos. Ambas operaciones deberán estar plasmadas en un procedimiento operativo y ser de conocimiento del personal encargado de realizar

las maniobras, ya que son operaciones que se realizan con poca frecuencia y los operadores no se encuentran familiarizados con éstas.

7. Es recomendable realizar una calibración mensual de los analizadores de oxígeno cuando se quemase aceite combustible y cada tres meses cuando sólo se quemase gas.
8. Es recomendable sellar cualquier ingreso de aire parásito al horno.
9. Con el objetivo de familiarizar a los operadores de campo con el movimiento de las persianas de ingreso de aire a los quemadores, es recomendable realizar una adecuada capacitación, cabe resaltar que cada modelo de quemador tiene un manejo diferente, dicho manejo tiene que ser claramente entendido por los operadores de campo para su correcta utilización. Es recomendable marcar la ubicación Abierto/Cerrado y numerar cada posición de las persianas en los quemadores para un buen control.
10. Es adecuado que se registre diariamente el cumplimiento de la frecuencia de deshollinados, ya que esto es un control clave que minimizará las pérdidas de calor al ambiente y disminuirá la velocidad de ensuciamiento de la zona convectiva.
11. Es recomendable colocar aislamiento térmico a las tuberías de aceite y vapor de atomización hasta la zona más cercana al quemador, ya que esto evitará disminución de temperatura, lo que origina altas viscosidades, por lo tanto derrame de aceite y malformación de llamas.
12. El supervisor encargado deberá definir en un formato entendible todas las variables claves a ser monitoreadas, es recomendable indicar el ahorro económico

y la minimización de los gases de efecto invernadero tales como CO₂ para impulsar el logro de objetivos por parte de todos los integrantes de la organización.

13. Es recomendable que cada Refinería analice su situación en particular e invierta en todos los controles y seguridades necesarios, para una correcta operación de sus Hornos.