

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD INGENIERIA DE PETROLEO, GAS Y PETROQUIMICA**



**DETERMINACION DE FACTORES DE DISEÑO Y OPERACIÓN QUE INFLUYEN EN  
LA CORROSION Y ENSUCIAMIENTO DE HORNOS DE PROCESO TIPO  
CILINDRICO VERTICAL**

**TESIS**

**PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO PETROQUIMICO**

**PRESENTADO POR:**

**CAROLA IRIS PALACIOS TOLEDO**

**PROMOCION 2002-0**

**LIMA – PERU  
2011**

A la memoria de mis Abuelos  
Porque el trabajo fue su mejor distinción  
y es el mejor y único recuerdo que vale

A mi Madre  
Porque en el papel más difícil  
siempre había una razón para insistir  
en el cumplimiento de objetivos

A mi Padre  
por creer en los proyectos propios  
y vivir disfrutando de la realización  
de cada uno de ellos

## SUMARIO

La conservación de la energía no es un tema nuevo, el éxito económico de cualquier proceso competitivo requiere del uso eficiente de energía. De la energía consumida en una Refinería de Petróleo, aproximadamente el 75% es utilizado como combustible en los Hornos de Proceso y Calderas.

La eficiencia térmica de los equipos de calentamiento, tales como los hornos, es calculada como el cociente entre el calor recibido por el producto y el calor suministrado por el equipo. Para muchos equipos de proceso, se presenta que una gran cantidad de calor liberado es desperdiciado en la forma de gases de combustión. Estas pérdidas dependen de varios factores asociados al diseño y la operación del equipo.

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de las variables asociado al diseño y la operación del equipo y la formulación de propuestas para el control y mejoramiento de las mismas con la finalidad de obtener resultados de buena operación de estos equipos, con altas eficiencias.

**INDICE**

|                   |   | Pág. |
|-------------------|---|------|
| <b>CAPITULO 1</b> | <b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>   |      |
| 1.1               | Problemática  | 01   |
| 1.2               | Formulación del Problema  | 03   |
| 1.3               | Objetivos   | 03   |
| 1.4               | Planteamiento de la Hipótesis   | 04   |
| 1.5               | Hipótesis   | 05   |
| 1.6               | Caracterización de Variables  | 06   |
| <b>CAPITULO 2</b> | <b>MARCO TEORICO</b>  |      |
| 2.1               | Hornos de Proceso   | 07   |
| 2.1.1             | Tipos de Horno  | 08   |
| 2.1.2             | Variaciones en el Diseño y Distribución   | 10   |
| 2.1.3             | Componentes del Horno   | 12   |
| 2.1.4             | Estándares internacionales aplicables al Diseño,<br>Inspección y Mantenimiento de Hornos de<br>Proceso. | 27   |
| 2.2               | Teoría de la combustión.  | 28   |
| 2.2.1             | Conceptos   | 28   |
| 2.2.2             | Caracterización de combustibles   | 29   |
| 2.2.3             | Importancia de la llama en el proceso de la<br>combustión   | 32   |

|                   |  |           |
|-------------------|--|-----------|
| 2.2.4             | Efecto Medio Ambiental del uso de combustible líquido                                | 38        |
| <b>CAPITULO 3</b> | <b>METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION</b>   | <b>40</b> |
| <b>CAPITULO 4</b> | <b>DESARROLLO DE LA EVALUACION</b>   |           |
| 4.1               | Problemas frecuentes en Hornos de Proceso Cilíndrico Verticales                      | 40        |
| 4.1.1             | Ensuciamiento en Hornos  | 40        |
| a.                | Acumulación de cenizas en superficie de los tubos de zona radiante y zona convectiva | 40        |
| 4.1.2             | Corrosión en Hornos  | 42        |
| a.                | Corrosión por alta temperatura   | 42        |
| b.                | Corrosión por cenizas fundidas   | 49        |
| c.                | Corrosión por bajas temperaturas   | 62        |
| 4.1.3             | Otros problemas  | 64        |
| a.                | Velocidad Másica adecuada  | 64        |
| b.                | Sobre combustión en Zona Convectiva  | 66        |
| 4.2               | Factores de Diseño y Operación que influyen en el ensuciamiento y corrosión          | 67        |
| 4.2.1             | Tiro del Horno de Procesos   | 67        |
| a.                | Condiciones de Diseño  | 67        |
| b.                | Condiciones de Operación   | 68        |
| 4.2.2             | Tipo de Tubos en Zona Convectiva   | 69        |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| a.                | Tubos aletados vs Tubos enteteados  | 69 |
| 4.2.3             | Vapor de desdrollinado en la zona convectiva del horno  | 71 |
| a.                | Condiciones de Diseño   | 71 |
| b.                | Condiciones de Operación  | 73 |
| 4.2.4             | Influencia del vapor de atomización en la formación de incrustaciones en los tubos del horno          | 73 |
| a.                | Condiciones de Diseño   | 73 |
| b.                | Condiciones de Operación  | 74 |
| <b>CAPITULO 5</b> | <b>PROPUESTA DE MEJORAS PARA MINIMIZAR EFECTOS DEL ENSUCIAMIENTO Y CORROSION DE HORNOS DE PROCESO</b> |    |
| 5.1               | Uso de aditivos   | 76 |
| 5.1.1             | Aditivo mejorador de la combustión (combustible líquido)  | 76 |
| 5.1.2             | Aditivo post combustión   | 77 |
| 5.2               | Mejoras en control de variables operativas  | 78 |
| 5.3               | Cambio de combustible   | 80 |
| <b>CAPITULO 6</b> | <b>PROPUESTA DE METODOLOGIA DE MONITOREO Y CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO Y CORROSION</b>                  | 82 |
| <b>CAPITULO 7</b> | <b>EVALUACION ECONOMICA</b>   |    |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| 6.1                | Uso de aditivos  | 85 |
| 6.2                | Mejoras en el Diseño y Control de Variables Operativas | 86 |
| 6.3                | Cambio de combustible                                  | 86 |
| <b>CAPITULO 8</b>  | <b>CONCLUSIONES</b>                                    | 88 |
| <b>CAPITULO 9</b>  | <b>RECOMENDACIONES</b>                                 | 90 |
| <b>CAPITULO 10</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                                    | 91 |
| <b>CAPITULO 11</b> | <b>ANEXOS</b>  | 92 |

# **DETERMINACION DE FACTORES DE DISEÑO Y OPERACIÓN QUE INFLUYEN EN LA CORROSION Y ENSUCIAMIENTO DE HORNOS DE PROCESO TIPO CILINDRICO VERTICAL**

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Problemática**

#### **Refinerías de petróleo**

Es conocido que el petróleo crudo no puede ser usado directamente, salvo algunas veces como combustible primario, razón por la que el petróleo luego de ser extraído del subsuelo debe ser procesado en las Refinerías.

Las Refinerías de Petróleo son complejos industriales cuyo trabajo consiste, en separar físicamente y someter a procesos químicos determinados (cuando es necesario), la gran variedad de componentes que contiene el petróleo crudo. El proceso consta de varias etapas, por lo que es común observar en las plantas numerosas torres, equipos y tuberías.

Cada refinería posee un esquema de procesamiento particular, acorde a su tecnología y capacidad. Así, el nivel de complejidad de una instalación determina el grado de aprovechamiento que se logra de cada barril. Además, en función al tipo de petróleo que puedan procesar, tendremos aquellas refinerías que reciben petróleos ligeros, petróleos pesados o una mezcla de ambos.

Los principales equipos de consumo de combustible (Energía) lo constituyen los Hornos de los diversos procesos con que cuenta la Refinería (Procesos de cambios Fisicoquímicos o de Conversión). El consumo de combustible depende



de las facilidades y el diseño del equipo, siendo principalmente Gas Natural o Petróleo Industrial.

La conversión de la energía es una necesidad actual, el éxito en la economía de cualquier proceso requiere el uso eficiente de energía. A las razones puramente económicas para mejorar la eficiencia energética, se han sumado las consideraciones medioambientales, hoy día en primer plano de la preocupación social. La reducción en los consumos energéticos implica automáticamente menor emisión de contaminantes formados durante la combustión, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, responsables de la “lluvia ácida”, junto a la reducción del CO<sub>2</sub> emitido, principal acusado de provocar el cambio climático en nuestro planeta a través del “efecto invernadero”

### **Gases de efecto invernadero y bonos de carbono**

Los gases de efecto invernadero inciden en el calentamiento global, sirven para mantener la temperatura del planeta, pero los abusos lo han convertido en un problema mundial. La fuerte industrialización a base del uso masivo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas) y gran parte de las actividades humanas contribuyen a incrementar estos gases de forma incontrolable. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el más conocido, pero no es el único: el vapor de agua, el metano, el ozono y otros gases como el trifluorometano, son también compañeros de grupo; No todos los gases producen el mismo efecto, por lo que se han elaborado unos parámetros para medir su influencia real: su impacto se expresa en cantidades de CO<sub>2</sub> equivalente. Así se ha establecido que el metano es un gas con un efecto invernadero más potente en términos absolutos que el CO<sub>2</sub>.

Sin embargo, las actividades humanas como el transporte o la industria emiten tal cantidad de CO<sub>2</sub>, que su contribución final en el efecto invernadero es mayor que la del metano.

### **Bonos de carbono**

Los bonos de carbono son un mecanismo que nació al amparo del protocolo de Kyoto, el cual obliga a que los países desarrollados reduzcan sus Gases Efecto Invernadero (GEI).

Para cumplir con sus metas de reducción de emisiones, los países desarrollados pueden financiar proyectos de captura o abatimiento de estos gases en otras naciones, principalmente en vías de desarrollo, acreditando tales disminuciones como si hubiesen sido hechas en territorio propio. Esto abarata significativamente los costos de cumplimiento. En concreto, esto significa que una empresa que disminuye sus emisiones de CO<sub>2</sub> puede vender esta reducción a empresas de países desarrollados que estén obligadas a bajar sus emisiones de GEI.

## **1.2. Formulación del Problema**

La necesidad de las Refinerías de Optimizar la operación de sus equipos, establece una necesidad constante: ¿Se podrá reducir la corrosión y el ensuciamiento de los hornos a través de la evaluación de factores de diseño y operación?

## **1.3. Objetivos**

### **Objetivo General**

- Mejora de la Eficiencia de los Hornos de Refinerías basado en la evaluación de factores de diseño y operación.

### **Objetivos Específicos**

- Obtener una reducción en el consumo de combustible a través de la aplicación de mejoras en los Hornos de Proceso en Refinerías de Petróleo, en base a la reducción del ensuciamiento.
- Realizar el análisis económico de diversas alternativas para mejorar el comportamiento y eficiencia de estos equipos, evitando los diversos tipos de corrosión.
- Proponer sistemas de evaluación para el monitoreo constante con la finalidad de detectar problemas.

### **1.4. Planteamiento de la Hipótesis**

De la formulación de los problemas, se establece los siguientes planteamientos:

Factores de Diseño de los Hornos de Proceso

- La adecuada especificación de los deshollinadores para la zona convectiva del Horno minimiza los problemas de ensuciamiento en los tubos.
- El uso de combustible Residual con tubos aletados en la zona convectiva produce mayor ensuciamiento que los tubos entetonados.
- Los Hornos de Proceso que no cuentan con damper en la chimenea no poseen un control adecuado del tiro de la zona radiante.
- La instrumentación adecuada permite contar con herramientas para verificar la correcta operación del equipo y contar con data histórica para análisis estadísticos futuros.

### Factores de Operación de los Hornos de Proceso

- El flujo de vapor que se utiliza en los deshollinadores influirá en la capacidad de soplado y eliminación de depósitos sobre la superficie de los tubos.
- El adecuado control del ingreso de aire primario y secundario a los quemadores del Horno asegura un exceso mínimo de aire que garantice una combustión completa sin disminuir la eficiencia del horno.
- El control de la temperatura en la zona de bridgewall permite determinar la eficiencia en la zona radiante del horno.
- La presencia de depósitos de óxido de vanadio junto con cenizas genera un fuerte ensuciamiento de los tubos de la zona convectiva y que no necesariamente generan corrosión por cenizas fundidas a altas temperaturas.

### 1.5. Hipótesis

La eficiencia de los hornos mejora a través del análisis y verificación en los factores de diseño y control en los factores de operación siguientes:

Factores de Diseño:

- Tiro del horno de procesos
- Tipo de tubos en zona convectiva
- Velocidad másica adecuada
- Sobre combustión en Zona Convectiva

Factores de Operación:

- Frecuencia de deshollinado

- Operación del vapor de atomización
- Uso de combustibles
- Control de variables de proceso

### **1.6. Caracterización de Variables**

Para la caracterización, se ha considerado las siguientes variables:

| <b>Parámetros<br/>(Variables Independientes)</b> | <b>Efectos Esperados<br/>(Variables Dependientes)</b> |
|--|---|
| Factores de Diseño y Operación                   | Eficiencia de los Hornos de Proceso                   |

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1. Hornos de proceso**

Un Horno de Procesos, incluye una serie de componentes en el cual se libera calor por la combustión de un combustible en un ambiente aislado internamente, el calor es transferido a un fluido que pasa a través de un serpentín de tubos.

La industria identifica estos hornos con los nombres comunes tales como: Calentadores de Proceso, Horno, Hornos de Proceso y Calentadores de Fuego Directo, todos los cuales son intercambiables.

La función fundamental de un Horno de Procesos es de proveer una cantidad específica de calor al fluido que está siendo calentado con altos niveles de temperatura sin ocasionar sobrecalentamientos localizados del fluido o de los componentes estructurales.

El tamaño de un Horno de Proceso, está definido en términos de la capacidad de absorción de diseño o Duty, el rango de Duties va desde 0.5 MMBtu/hr hasta unidades especiales de 1000 MMBtu/hr para servicio en Hornos de Reformado.

El rango de la vasta mayoría de Hornos instalados va de 10 a 350 MMBtu/hr.

Tabla N° 2.1  
Especificaciones de Hornos de Proceso

| Process                                  | Flux Radiante<br>BTU/h-ft <sup>2</sup> | Velocidad Másica<br>lb/sec-ft <sup>2</sup> | ΔP del Proceso<br>psi | Metalurgia del<br>Serpentín |
|--|--|--|-----------------------|-----------------------------|
| Crudo                                    | 10,000                                 | 200 min                                    | 150                   | 5 Cr o 9 Cr                 |
| Vacío                                    | 8,000                                  | 250 min                                    | 75                    | 5 Cr o 9 Cr                 |
| Visbreaking                              | 7,000 - 8,000                          | 350 min<br>(5-6 fps petroleo frio)         | 250 - 300             | 9 Cr                        |
| Coking                                   | 9,000                                  | 400 min<br>(6 fps petroleo frio)           | 300                   | 9 Cr                        |
| Platforming Semi-Regn                    | 10,000                                 | 40 - 50                                    | 7                     | 2-1/4 Cr                    |
| Platforming CCR                          | 10000 SFU<br>15,000 DFU                | 23 - 35                                    | 3 por celda           | 9 Cr                        |
| Reboiler                                 | 10,000                                 | 150 - 300                                  | 50                    | C.S.                        |
| Aceite Caliente                          | 10,000                                 | 400 - 600                                  | 65                    | C.S.                        |
| Hidrotratamiento de Nafta                | 10,000                                 | 70 - 180                                   | 50                    | 9 Cr                        |
| Hidrotratamiento de Nafta<br>con craqueo | 10,000                                 | 70 - 180                                   | 50                    | 347                         |
| Hidrotratamiento de Kerosene             | 10,000                                 | 150 - 250                                  | 50                    | 347H SS                     |
| Hidrotratamiento de Diesel               | 10,000                                 | 150 - 250                                  | 50                    | 347H SS                     |
| Hidrocrqueo de Gas                       | 10,000<br>13,000                       | 50 - 80                                    | 30 - 50               | 347H SS                     |
| Hidrocrqueo de Gas y Líquido             | 15,000                                 | 180 -300                                   | 50 - 80               | 347H SS                     |

Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 8.2.

### 2.1.1 Tipos de horno de proceso

Existe una diversidad de maneras para la aceptación de tipos de hornos debido a la multiplicidad de fines al que se los destina, por lo que su definición se fija en función al proceso en el que se realiza.

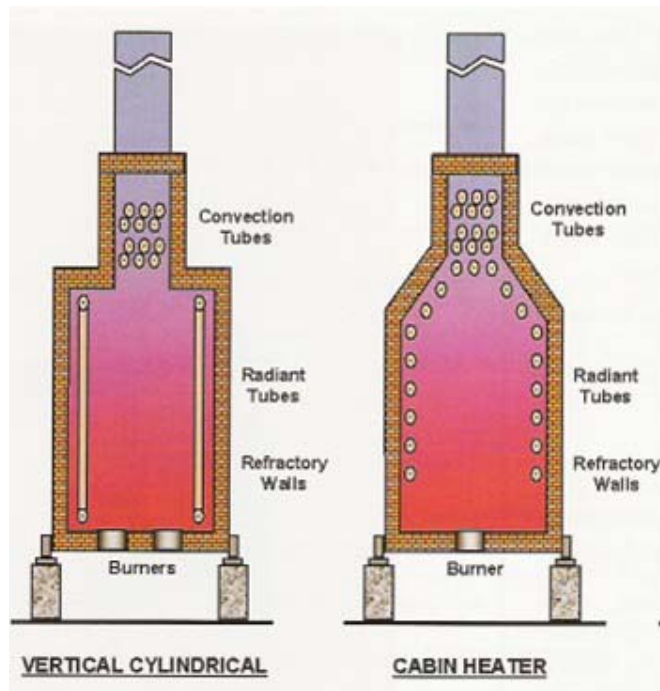
Los Hornos se podrían tipificar de la siguiente manera:

#### Por su Uso

- Solo Calentar (Por ejemplo, un Horno de aceite térmico)
- Calentar y evaporar (Por ejemplo, un hervidor, horno de Crudo)
- Cracking (Por ejemplo un horno de etileno)
- Reformado Catalítico (Por ejemplo un horno de Hidrogeno)
- Incineración

#### Por su Forma

- Hornos Cilíndricos Verticales
- Hornos de Cabina



*Figura 2.1:* Hornos Cilíndricos Verticales y de Cabina  
*Fuente:* The John Zink Combustion Handbook, pag. 09.



*Figura 2.2:* Hornos Cilíndricos Verticales con Zona Radiante y Convectiva (lado izquierdo), y sólo Zona Radiante (lado derecho)



*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 09.



*Figura 2.3:* Horno de Cabina

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 356.

### **2.1.2 Variaciones en el diseño y distribución**

Aun, con los tipos definidos anteriormente, existen muchas variaciones en la distribución, diseño y detalle al momento de la construcción del horno. Como consecuencia de esta flexibilidad, cada Horno de Procesos es diseñado para cada aplicación particular.

El tipo más simple, es el diseño de un Horno con solo una caja de radiación (transferencia de calor por radiación), que normalmente representa el de menor eficiencia y menor costo de inversión para un Duty dado.

En adición a la zona radiante, actualmente los hornos incluyen una Zona Convectiva. El calor residual de los gases de combustión que salen de la

Zona Radiante se recupera en la Zona Convectiva (transferencia de calor por convección); este arreglo permite incrementar la eficiencia térmica del Horno de Proceso.

### **Serpentines de tubos: Horizontal vs Vertical**

La clasificación más importante de Hornos de Proceso, se relaciona a la orientación del serpentín de tubos en la Zona de Radiación:

**a. Horno de proceso cilíndrico vertical:** El serpentín de tubos en la Zona Radiante está distribuido verticalmente a lo largo de las paredes de la cámara de combustión, la llama también es vertical desde el piso del Horno; en la Zona convectiva, el serpentín tiene un arreglo con un banco de tubos horizontales posicionado sobre la cámara de combustión. A partir de este diseño, existen arreglos que consideran, por ejemplo: Hornos Verticales con dos zonas de radiación y una zona convectiva, etc.



*Figura 2.4: Horno Cilíndrico Vertical*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 356.*

### **HORNO CILINDRICO VERTICAL**

- Es el horno más común
- Tubos verticales en zona radiante
- Tubos horizontales en zona convectiva
- De bajo costo
- Ocupa poco espacio
- Fácil de construir
- Bueno para pequeños duties
- Máximo duty de proceso es 170 MM btu/h.

- b. Horno de proceso cabina horizontal:** El serpentín de tubos de la Zona Radiante están distribuidos horizontalmente, la zona convectiva tiene una posición como un banco de tubos horizontal sobre la cámara de combustión. Normalmente los quemadores pueden estar ubicados verticalmente desde el piso del Horno o de manera horizontal montados en la pared localizado debajo del serpentín de tubos.



*Figura 2.5:* Horno de Cabina

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 356.

### **HORNO DE CABINA**

- 2 zonas radiantes con tubos horizontales
- Zona convectiva común con tubos horizontales
- 15-20% mas costoso que horno cilíndrico vertical
- Ocupa mayor espacio
- Se utiliza para duties de proceso > 170 MM btu/h

### **2.1.3 Componentes del horno**

- a. Zona radiante:** La zona del Horno de Proceso en la cual el calor es transferido a los tubos primariamente por radiación. En un Horno Cilíndrico Vertical, la ganancia de calor llega hasta un 80% del total de calor recuperado. Los tubos siempre se encuentran refrigerados por el líquido a calentar en el horno (Crudo, crudo reducido, etc.), y la

metalurgia generalmente utilizada es de aceros de baja aleación resistentes a alta temperatura; hasta 1990 se usaban tubos de 5 Cr- ½ Mo, actualmente se ha mejorado a 9 Cr - 1 Mo ya que permiten una mejor resistencia a la corrosión a altas temperaturas como se observa en las siguientes figuras:

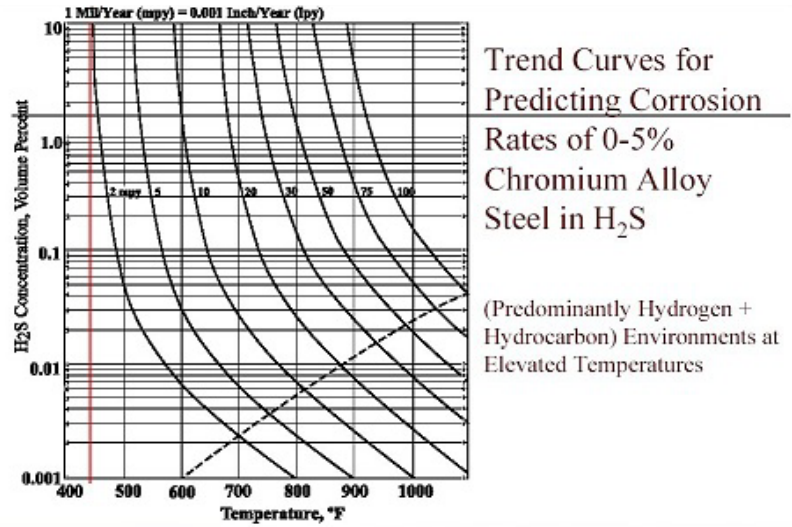


Figura 2.6: Curva de Predicción de Corrosión Tubos de 5Cr.½ Mo  
Fuente: Working Guide to Process Equipment, pag. 150.

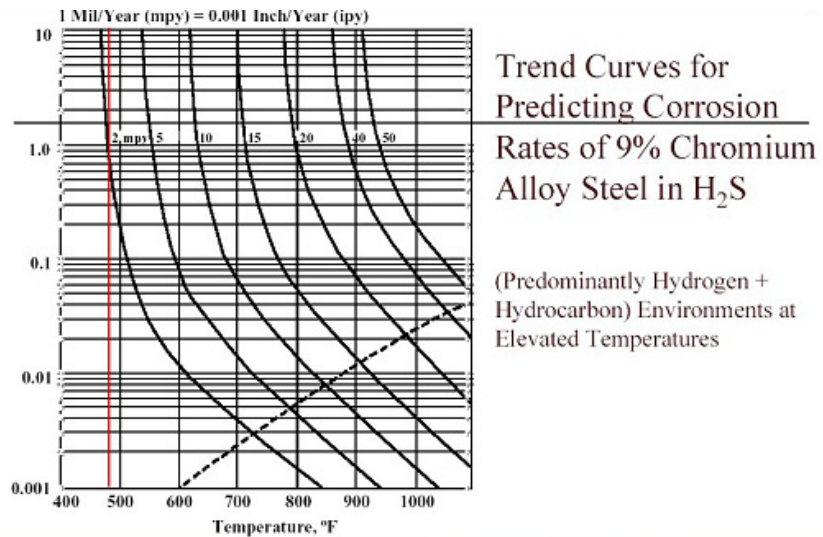
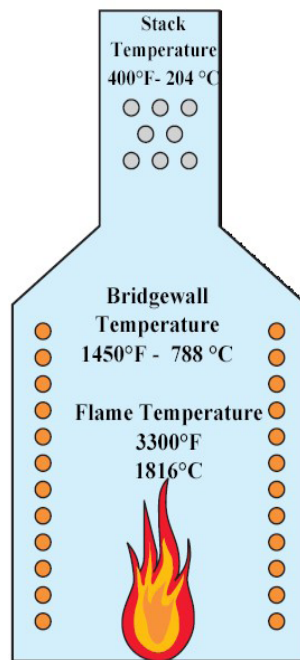


Figura 2.7: Curva de Predicción de Corrosión Tubos de 9Cr ½ Mo  
Fuente: Working Guide to Process Equipment, pag. 151.

Para los soportes de los tubos que no tienen refrigeración y siempre están a la temperatura de la zona radiante se usa acero inoxidable 25Cr.20Ni que generalmente se les protege con una cubierta de refractario y aleaciones de Cr-Ni como la INCO 657 que es 50 Cr-50 Ni estabilizado. Las temperaturas típicas que se registran en un Horno Cilíndrico vertical son:

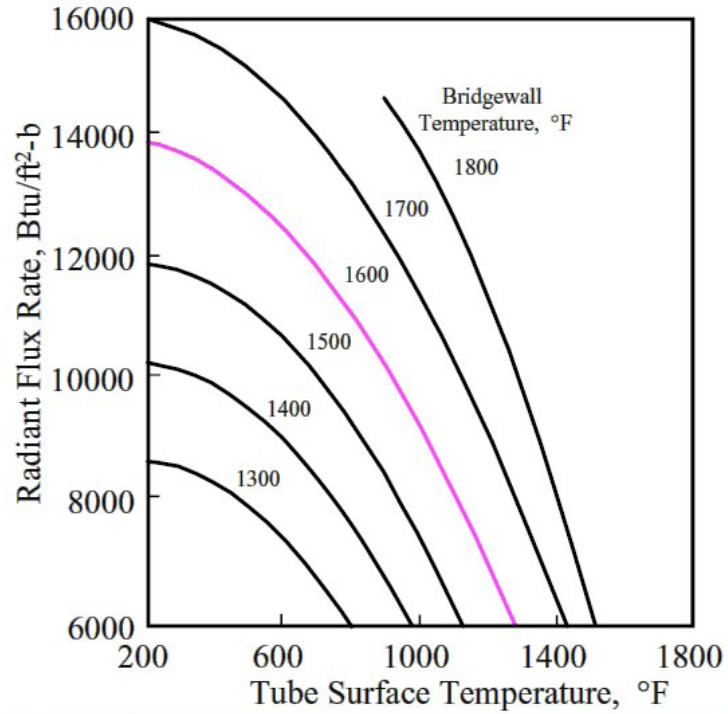


- **Flame Temperature**
  - **Depends on Fuel Composition**
- **Radiant exit or Bridgewall Temperature**
  - **Depends on Tube Temperatures and Heat Flux**

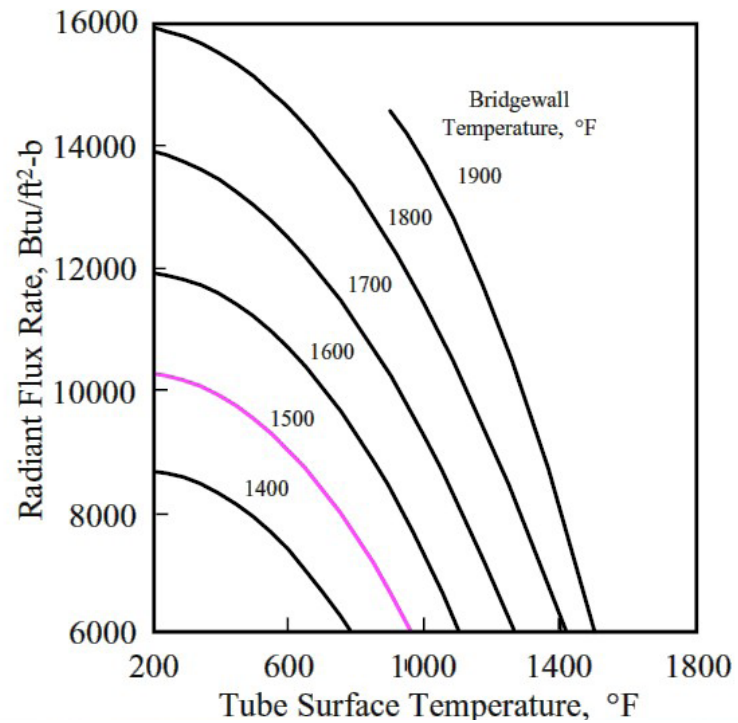
*Figura 2.8:* Temperaturas Típicas de un Horno de Procesos

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 2.2

Las Temperaturas que se registran en diversos puntos del Horno dependerán del flux radiante con el que se opera el Horno. Así:



*Figura 2.9:* Flujo de Calor vs Temperatura de Tubos Verticales  
*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 48



*Figura 2.10:* Flujo de Calor vs Temperatura de Tubos Horizontales  
*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 49

**b. Zona convectiva:** Es la zona del Horno de Procesos en la cual la transferencia de calor a los tubos es primariamente por convección. Permite la recuperación de hasta un 25% del calor recuperado en un horno cilíndrico vertical.

Los tubos siempre se encuentran refrigerados por el líquido a calentar en el horno (Crudo, crudo reducido, etc.) se usan aceros de baja aleación resistentes a alta temperatura, hasta 1990 se usaban tubos aletados de 5Cr.½Mo, actualmente se ha mejorado a tubos atetados de 9Cr.½Mo. Para los portatubos y soportes que están a la temperatura de la zona convectiva se usa acero fundido o fundiciones.

Tubos Aletados.- Con la finalidad de ganar la mayor cantidad de calor los tubos de la zona convectiva han tenido una evolución de forma en el tiempo, inicialmente fueron tubos aletados – Fin tubes (ver figura 3.11). Presentan buena transferencia de calor, pero alta caída de presión y sobre todo la característica de alto ensuciamiento por el particulado de los humos de combustión u hollín de combustibles líquidos pesados aún cuando se utilicen sopladores de hollín (equipo con bayoneta que inyecta vapor de 15 a 17 kg/cm<sup>2</sup>g sobre los tubos de la zona convectiva).



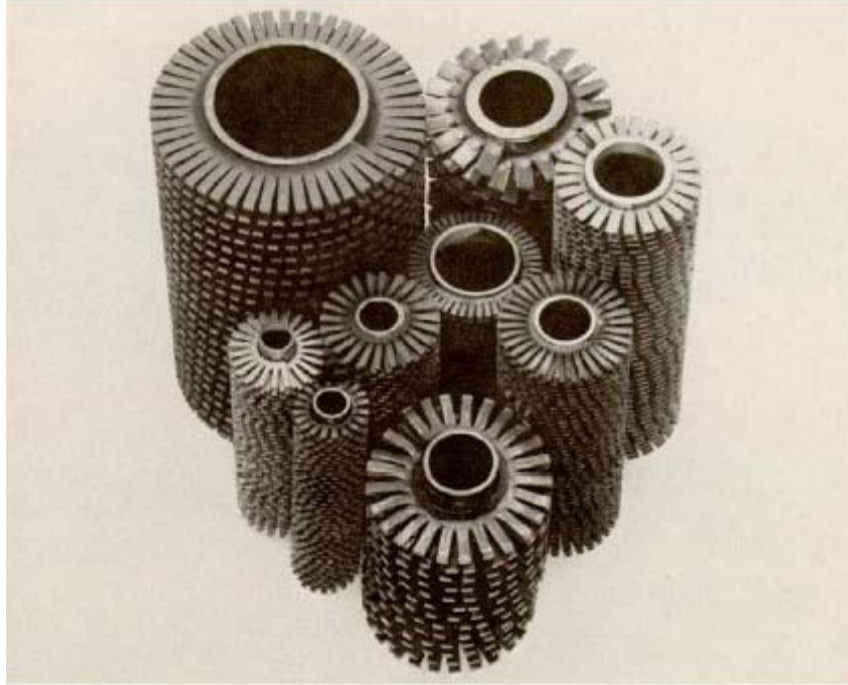


*Figura 2.11:* tubos aletados – Fin tubes

Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.3.

Tubos Aletados Segmentados: Posteriormente se diseñaron los tubos aletados segmentados (ver figura 2.12) que permiten un mejor limpiado por los sopladores de hollín, la eficiencia térmica después de la limpieza con vapor es mejor que los tubos aletados pero la caída de presión es aún alta (ver figura 2.13 y 2.14).





*Figura 2.12:* Tubos aletados segmentados –Segmented Fin tubes  
*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.4



*Figura 2.13:* Nivel de Ensuciamiento Tubos aletados segmentados

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 86



*Figura 2.14:* Tubos aletados segmentados después de limpieza

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 87.

Tubos Entetonados.- Finalmente se han diseñado los tubos entetonados - stud tubes (ver figura 2.15 y 2.16), que permite una mejor limpieza con los sopladores de hollín con vapor, con un mayor incremento en su eficiencia térmica y disminución de la caída de presión especialmente con el uso de combustible líquido:



*Figura 2.15:* Tubos entetonados –Stud tubes

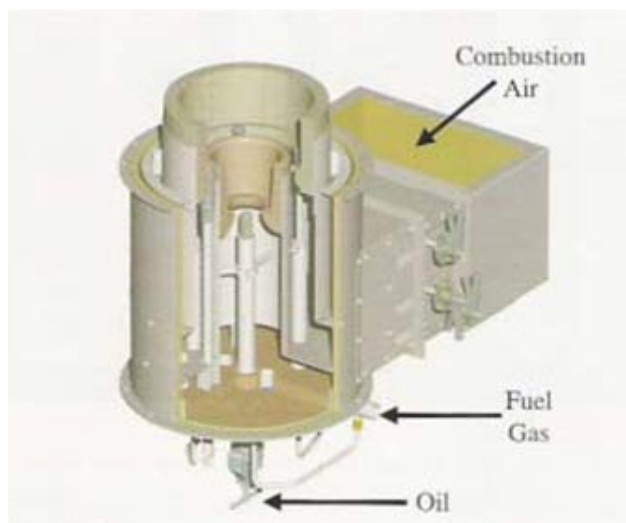
*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.4



*Figura 2.16:* Tubos entetonados –Stud tubes en uso

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.3

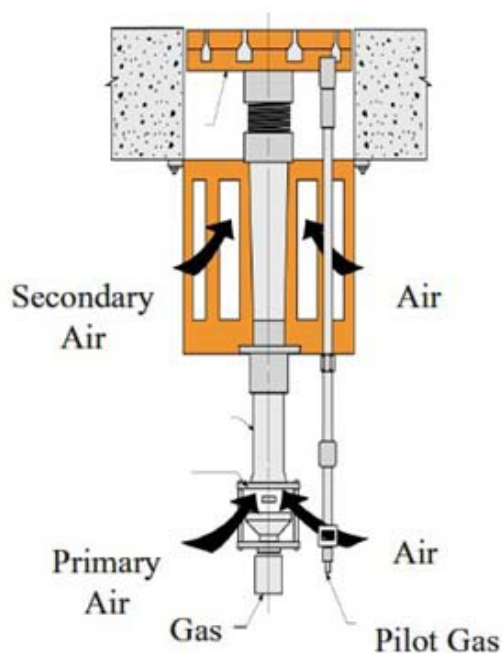
- c. **Chimenea:** Un conducto vertical usado para descargar los gases de combustión a la atmósfera. La altura de la chimenea depende normalmente de requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos. También hay que tener en cuenta el tiro o “draft” de la chimenea cuando este es natural. Llamamos Tiro a la diferencia de presión entre presión atmosférica y la presión en chimenea a la misma altura. (Indicado en pulgadas de agua) interesa que la presión en el interior del horno y chimenea sea siempre inferior al exterior, ya que la dirección de los fluidos va siempre de mayor a menor presión, en el borde de la chimenea esta presión ha de ser mayor a la ambiente para favorecer la salida de gases.
- d. **Quemadores:** Los quemadores tienen por finalidad provocar la mezcla íntima del aire y del combustible para obtener la combustión completa del mismo como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 2.17:* Ingreso de Aire y Combustible en un Quemador  
*Fuente:* The John Zink Combustion Handbook, pag. 34.



Todos los quemadores poseen entradas de aire primario y aire secundario; el aire primario tiene como objetivo el suministro de aire en exceso para la combustión del combustible, el aire secundario permite modular la forma de llama en la cabina de la Zona Radiante:



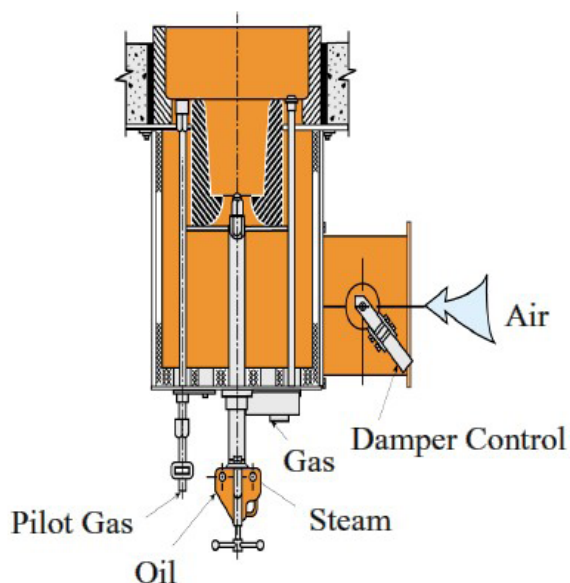
*Figura 2.18: Ingreso de Aire Primario y Secundario*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 149.*

El combustible desemboca en la corriente de aire en el centro de un anillo refractario, que, por el calor que irradia, asegura la estabilidad de la llama.

Un quemador se concibe para quemar gas o Petróleo Industrial de diverso grado de viscosidad; actualmente existen quemadores duales que permiten la quema de Petróleo Industrial y Gas en un mismo quemador pero con diferentes lanzas.

En el caso de la combustión del aceite (Diesel, Petróleos Industriales), hace falta que se encuentre finamente pulverizado en la corriente de aire de combustión. Esta pulverización se obtiene, con la ayuda de vapor de agua, o bien mecánicamente. En los quemadores con pulverización con vapor, el aceite combustible y vapor se mezclan en una cámara y salen, juntamente, por el orificio del quemador con el aspecto de una niebla compuesta de partículas muy pequeñas. El consumo de vapor es de, aproximadamente de 30 a 35% del peso de combustible.

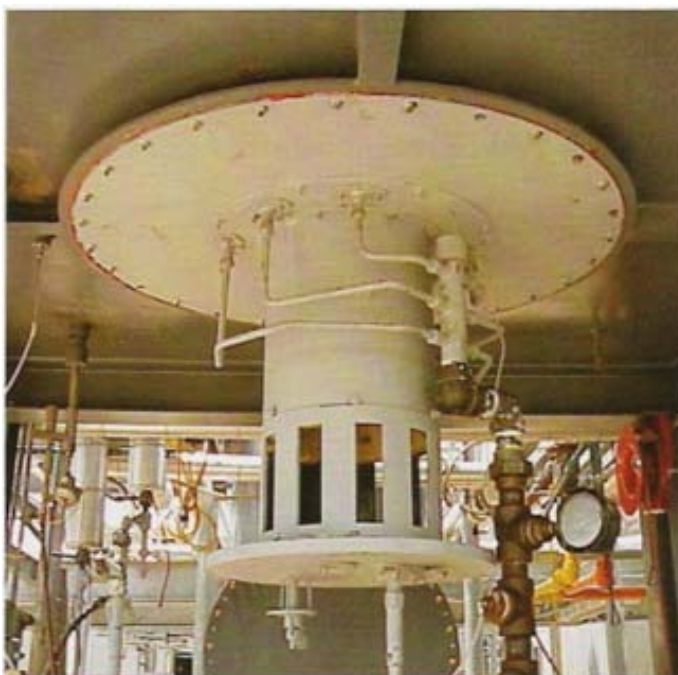


*Figura 2.19:* Quemador dual quema Gas y aceite combustible

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 149

Para Hornos de tiro natural o de tiro forzado, la diferencia principal en los quemadores se encuentra en el ingreso de la entrada de aire (primario y secundario) por un mismo ducto. La figura 3.19, muestra

un quemador de tiro forzado, donde el ingreso de aire, se realiza por un ducto controlado automáticamente por un dámper. La figura 2.20 muestra un quemador de tiro natural donde se observa que no existe ningún control automático sobre el ingreso de aire:



*Figura 2.20: Quemador de Gas combustible de tiro natural*

*Fuente: The John Zink Combustion Handbook, pag.32.*

- e. **Serpentín de tubos:** Los serpentines de tubos del Horno, están compuestos por tubos rectos y U-bends o H-bends. La posición del serpentín, con referencia al eje del tubo, es horizontal o vertical.

La posición horizontal tiene ventajas desde el punto de vista de proceso ya que se observa una mejor estabilidad de un flujo en doble fase.

En la Zona Radiante, es el lugar con más alto nivel de temperatura y por lo tanto el sitio donde la resistencia mecánica del serpentín es

mayor. En la zona convectiva existe un nivel de temperatura menor que en la Zona de Radiante, generalmente en esta zona los tubos se instalan en posición horizontal por ventajas en la arquitectura del horno.

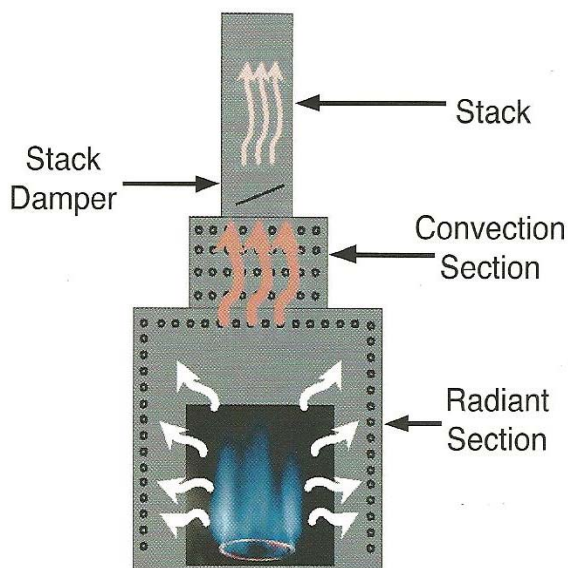
- f. Soportes de tubos:** Estos componentes se utilizan para soportar los tubos internos del horno. Para soportar un tubo vertical solo es necesario dos soportes independientemente de la longitud del tubo. La disposición de tubos verticales es más ventajosa que la de los tubos horizontales ya que para soportar un tubo horizontal se necesita más de dos soportes por tubo y no se puede evitar que los soportes intermedios estén expuestos a la influencia de los gases de combustión, cuando estos contengan óxidos de vanadio en porcentajes que puedan causar daños por corrosión originados por el  $V_2O_5$ .
- g. Mirillas y puertas de entrada:** Las Mirillas sirven para poder vigilar la llama y su posible incidencia en el serpentín de los tubos dentro de la cámara de radiación. Las puertas de entrada permiten el acceso al interior del horno para la inspección y mantenimiento de los componentes internos con el equipo fuera de servicio. Estos accesorios no deben permanecer abiertos ya que se promueve el ingreso de aire que afecta la eficiencia térmica del horno.
- h. Dámper:** La función del dámper de chimenea es la de controlar el tiro del Horno manteniendo una presión negativa de aproximadamente



0.05 in H<sub>2</sub>O en la zona bridgewall (debajo de la zona convectiva). El dámper se ajusta para mantener esta presión negativa.

- i. Refractorio:** La estructura metálica del cilindro se recubre internamente con un material aislante. Además de cumplir la función de prevenir el sobrecalentamiento de la estructura de acero, el aislante sirve para conservar el calor de la cámara de combustión a altas temperaturas por la re-radiación del calor hacia el tubo y con ello minimiza, además, las pérdidas de calor. Este aislante sirve, también, como una barrera para prevenir la fuga de material particulado de los gases de combustión a través de la estructura metálica, esta fuga, en el caso de combustibles con compuestos azufrados puede producir corrosión acida sobre la plancha de la estructura.
- j. Deshollinadores:** En el caso que el horno utilice Petróleo Industrial como combustible, es necesario el uso de deshollinadores o “Soot Blowers”. Son lanzas de vapor que pueden rotar y que van inyectando vapor a través de orificios existentes a lo largo de la lanza. Permite la remoción de cenizas, óxidos de vanadio y otros depósitos que se depositan entre la superficie extendida de los tubos de la zona convectiva. Es preferible usar tubos entetonados en vez de tubos aletados cuando se tiene un problema de ensuciamiento fuerte. El deshollinador debe de ubicarse como mínimo en un espacio de 1 - 2 pies entre los tubos de la zona convectiva. La efectividad del deshollinador esta limitado por el peso de la ceniza que se genera.

Existen combinaciones de cenizas químicas y temperaturas del gas de combustión (flue gas) que producen cenizas que no pueden ser removidas con el deshollinado; asimismo, combustibles altamente corrosivos pueden reducir la vida de la lanza.



*Figura 2.21: Partes típicas de un Horno de Procesos*

*Fuente: The John Zink Combustion Handbook, pag. 12.*

#### **2.1.4 Estándares internacionales aplicables al diseño, inspección y mantenimiento de hornos de proceso.**

##### **Estándares API (American Petroleum Institute):**

- API 560 - “Fired Heaters for General Refinery Service”.
- API 530 - “Calculation of Heaters Tube Thickness in Petroleum Refineries”.
- API 535 - “Burners for Fire Heaters in General Refinery Services”.

- API 556 - “Instrumentation and Controls Systems for Fire Heaters and Steam Generators”.
- API 935 - “Thermal Conductivity Measurements Study of Refractory Castables”.
- API 936 - “Refractory Installation Quality Control Guide Lines – Inspection and Testing Monolithic Refractory Lining and Materials”

**Estándar NFPA (National Fire Protection Association):**

- NFPA 86 – “Standard for Ovens and Furnaces”

**Estándar UOP (Universal Oil Products)**

## **2.2. Teoría de la combustión.**

### **2.2.1 Conceptos**

Se entiende por combustión a toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor. En toda combustión, el elemento que arde se denomina combustible y el que produce la combustión, comburente. Una combustión es la reacción del oxígeno con diversas sustancias, en general el carbono y el hidrógeno. En la mayoría de los casos el portador del oxígeno es el aire; el nitrógeno, azufre, etc. se combinan originando una gran variedad de compuestos tales como, anhídrido sulfuroso, NO<sub>x</sub>, etc.

La combustión se verifica tanto mejor cuanto más íntimamente estén unidos el combustible y el comburente, por lo que los combustibles más apropiados para realizar una combustión perfecta son los combustibles gaseosos.

Cuando un combustible líquido o gaseoso se introduce en un hogar, al ponerse en contacto con el aire, el combustible alcanza la temperatura de inflamación, y entra en combustión sin que se requiera ninguna transformación intermedia.

La combustión se denomina completa o perfecta, cuando toda la parte combustible se ha oxidado al máximo. Si la combustión es incompleta o imperfecta, los productos de la combustión poseen sustancias todavía capaces de ser oxidadas, por ejemplo el CO que puede pasar a CO<sub>2</sub>. La combustión incompleta aparece cuando el aire es insuficiente, o en aquellas zonas de las cámaras de combustión en las que el aire no llega en cantidad suficiente. En general se tiende a evitar las combustiones incompletas, ya que no sólo van ligadas a pérdidas de energía, sino también a procesos altamente contaminantes; el combustible que no ha reaccionado y los componentes combustibles de los humos, contienen una energía química que no se aprovecha, al tiempo que se generan elementos inquemados CH, y elementos contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, etc.

### **2.2.2 Caracterización de combustibles**

Según Norma Técnica Peruana NTP las mezclas de hidrocarburos utilizados para generar energía por medio de combustión se subdividen en:

- Clase I: Punto de inflamación menor de 37.8 °C (100 °F).
- Clase II: Punto de inflamación igual o mayor de 37.8 °C (100 °F) pero menor de 60 °C (140°F).

- Clase III A: Punto de inflamación igual o menor de 60 °C (140 °F) pero menor de 93 °C (200°F).
- Clase III B: Punto de inflamación igual o mayor a 93 °C (200 °F).

Dentro de la Clase I se consideran los combustibles como la Gasolina, en la Clase II, se considera al Kerosene, Diesel y al Turbo, dentro de la Clase III se encuentran los residuales y Asfaltos.

A continuación, se detallan algunas de las especificaciones de los diferentes combustibles Industriales.

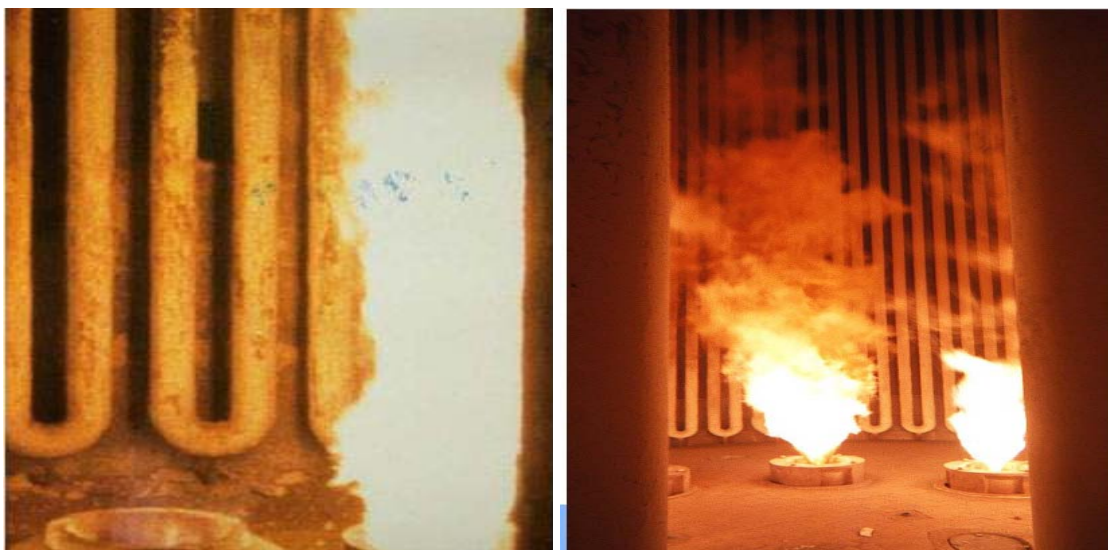
Tabla N° 2.2  
*Especificaciones de Combustibles Industriales*

|                                   | <b>Diesel 2</b> | <b>Petróleo Industrial 6</b> | <b>Alta Viscosidad</b> |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------|
| <b>Gravedad °API</b>              | 33              | 15.2                         | 14.3                   |
| <b>Punto de Inflamación (°C)</b>  | 52              | 105                          | 110                    |
| <b>Cenizas (% peso)</b>           | 0.01            | 0.07                         | 0.08                   |
| <b>Punto de Fluidez (°C)</b>      | -10             | 15                           | 16                     |
| <b>Azufre (% peso)</b>            | 0.04            | 1.2                          | 1.3                    |
| <b>Poder Calorífico (BTU/gal)</b> | 140 000         | 151 000                      | 151 700                |
| <b>Agua y Sedimentos (% Vol.)</b> | 0.0             | 0.1                          | 0.1                    |
| <b>Gravedad Específica</b>        | 0.8602          | 0.9646                       | 0.9785                 |

*Fuente:* Norma Técnica Peruana de Combustibles líquidos

Tabla N° 2.3  
*Características típicas del Gas Natural CAMISEA PERU*

| <b>Componente</b>                            | <b>Porcentaje</b> |
|--|-------------------|
| Nitrógeno                                    | 0.6               |
| Dióxido de Carbono                           | 0.2               |
| Metano                                       | 87.3              |
| Etano  | 9.7               |
| Propano                                      | 1.8               |
| i-butano                                     | 0.1               |
| n-butano                                     | 0.2               |
| Pentanos                                     | 0.1               |
| <b>Características</b>                       |                   |
| Gravedad Especifica                          | 0.63              |
| Poder Calorífico Neto, BTU/ pie <sup>3</sup> | 895               |



*Figura N° 2.22: Combustión de Gas Natural (azul) y Aceite combustible (naranja)*  
*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 256*

### **2.2.3 Importancia de la llama en el proceso de la combustión**

En términos teóricos, la llama es el medio gaseoso en el que se desarrollan las reacciones de combustión, produciendo radiaciones luminosas de origen tanto térmico como químico, que constituyen manifestaciones de las condiciones en que se efectúa la generación de calor.

La creación y mantenimiento de una llama apropiada, es un requisito previo e imprescindible para el aprovechamiento racional de la energía contenida en el combustible y es capaz de arder en forma de calor.

#### **Temperatura de la Llama**

A esta temperatura, se le denomina también, temperatura teórica de combustión, temperatura adiabática de combustión o temperatura de combustión estequiométrica, con mezcla perfectamente homogénea y en un tiempo brevísimo que no permita pérdidas caloríficas con el ambiente.

#### **Formación y Características de las Llamas en Petróleos Residuales**

En el caso de los residuales, quizá con mayor claridad que con el resto de combustibles, las manifestaciones visibles de la llama representan una buena oportunidad de conocer la forma y eficiencia con que se realiza la combustión y la manera de actuar sobre ella.

Esto se explica porque las reacciones de combustión se realizan con características que se manifiestan en el espectro visible al ojo humano. En otros combustibles como el gas natural, la mayor proporción de reacciones y fenómenos de generación y transferencia de calor se producen en la

banda del espectro que corresponde al infrarrojo que no es visible al ojo humano.

Tanto la forma, como la coloración de la llama resultan factores de importante utilidad para controlar el proceso de combustión:

- a. La forma de la llama de los combustibles residuales se pueden definir claramente por involucrar la presencia de manifestaciones visibles.

Desde la punta del inyector, se observara la pluma de la llama constituida por el chorro de combustible líquido atomizado en proceso de calentamiento y mezcla con el aire antes de encenderse en el llamado frente de llama, donde se inicia la extensión de la misma.

Al encenderse la llama se presenta una coloración que permite observar el propio frente de la llama, por encontrarse a partir de este punto partículas de carbón que al calentarse hasta incandescencia, emiten en el espectro visible la coloración de la llama que identifica los productos intermedios de la combustión de los hidrocarburos, es decir, aldehídos, cetonas, etc.

A lo largo y ancho, la llama quedara enmarcada por la coloración que manifiestan las partículas de carbón y metales incandescentes.

En el extremo final, la coloración se extingue sea porque todo el material combustible ya ha reaccionado (improbable) o porque la temperatura en esa zona ya resulta insuficiente para que siga produciéndose las reacciones de combustión, quedando una parte del combustible (coque) como inquemados que se depositan en el interior



del horno o salen por la chimenea constituyendo pérdidas de calor y causas de contaminación ambiental.

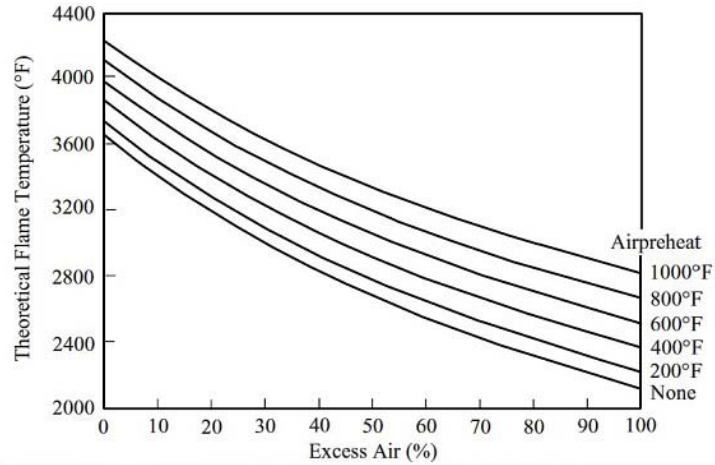
Se debe considerar que las llamas deben tener la forma que se ajuste a las dimensiones de la cámara de combustión y/o las características del proceso debiendo desarrollarse en un espacio libre, sin tocar ningún punto de las paredes o cuerpos extraños.

- b. El color de las llamas de los petróleos industriales resulta un criterio útil para conocer la temperatura que se produce en cada punto. En la Tabla N° 2.4 se presentan las temperaturas que corresponden a los colores comúnmente observados en los diferentes tipos de llamas, En la Figura N° 2.23 y 2.24, se presentan las temperaturas teóricas de llama para Gas Natural y Petróleo Industrial en función del exceso de aire.

Tabla N° 2.4:  
Color de temperaturas observadas en la llama

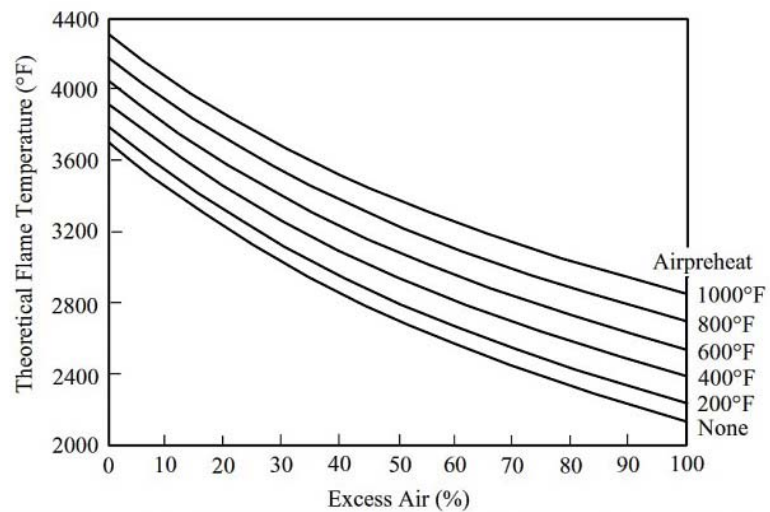
| <b>Color</b>                        | <b>°F</b>   | <b>°C</b>   |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Rojo suave                          | 875         | 475         |
| Rojo suave a rojo oscuro            | 875 - 1200  | 475 – 650   |
| Rojo oscuro a rojo cereza           | 1200 - 1375 | 650 – 750   |
| Rojo cereza a rojo cereza brillante | 1375 - 1500 | 750 – 825   |
| Rojo cereza brillante a naranja     | 1500 - 1650 | 825 – 900   |
| Naranja a amarillo                  | 1650 - 2000 | 900 – 1090  |
| Amarillo a amarillo brillante       | 2000 - 2400 | 1090 – 1320 |
| Amarillo brillante a blanco         | 2400 - 2800 | 1320 – 1540 |
| Blanco a blanco deslumbrante        | Más de 2800 | Más de 1540 |

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 5.8



*Figura N° 2.23:* Temperatura de Llama con Gas Natural vs Exceso de Aire

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 5.6

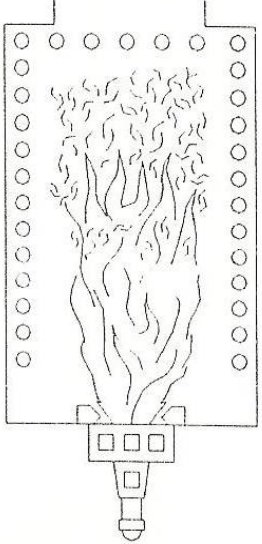
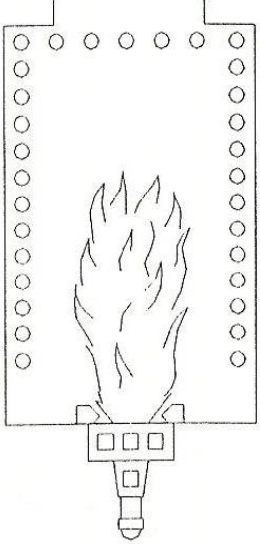
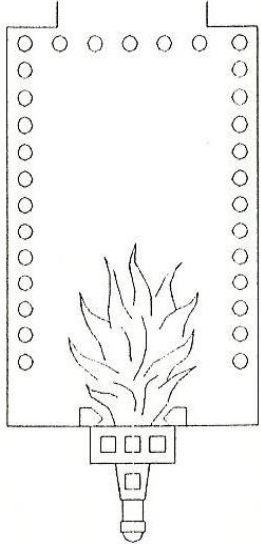
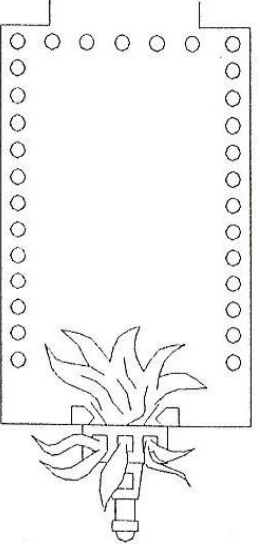


*Figura N° 2.24:* Temperatura de Llama con Petróleo Industrial vs Exceso de Aire

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 149.

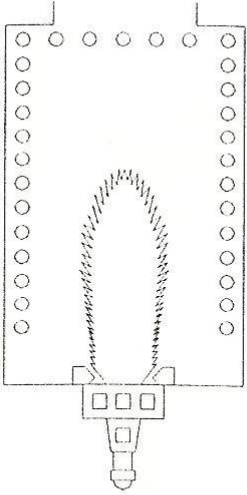
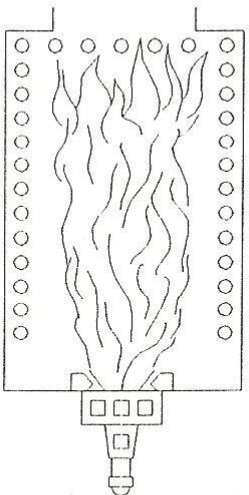
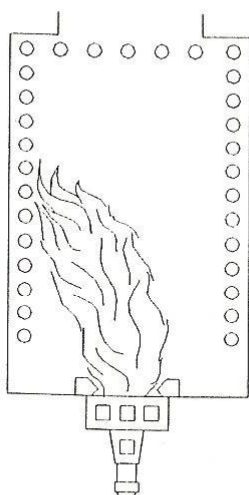
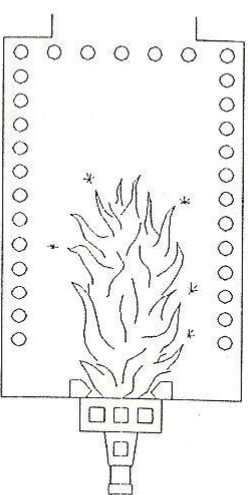
- c. La forma de la llama, permite determinar las variables que pueden afectar una adecuada formación de la misma. En las Tablas 3.6 y 3.7, se presenta el efecto de las variables como: Humedad en vapor de atomización, porcentaje de exceso aire, calidad del combustible, etc.:

Tabla 2.5  
Efecto de Principales variables en la Forma de la llama

| 5. Mala llama de aceite combustible.   | 6. Mala llama de aceite combustible   | 7. Mala llama de aceite combustible  | 8. Retroflama de aceite combustible.   |
|--|---|--|--|
|    |             |                          |          |
| <p>Llama humeante.<br/>Muy poco aire de combustión.<br/>Boquillas de quemadores dañadas.<br/>Combustible frío.<br/>Cabezal de quemador ajustado muy debajo de su posición.</p> | <p>Llama deslumbrante.<br/>Demasiado aire secundario.<br/>Demasiado vapor de atomización.</p> | <p>Llama de forma irregular - pobre.<br/>Muy poco aire primario.<br/>Enladrillado (tazón) muy espaciado.</p> | <p>Muy poco tiro.<br/>Muy poco aire primario (combustible).<br/>Presión de gas muy baja.</p> |

Fuente: Tesis "Estudio y análisis del Proceso de corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo, pag. 23.

Tabla 2.6  
Efecto de Principales variables en la Forma de la llama

| 1. Buena llama de aceite combustible.   | 2. Mala llama de aceite combustible  | 3. Mala llama de aceite combustible  | 4. Mala llama de aceite combustible.  |
|---|--|--|---|
|                                  |   |   |    |
| <p>Quieta, clara, sin humos, llama sostenida, continua y estable.<br/>Color: de amarillo brillante a naranja.</p> | <p>Llama larga<br/>Llama impacta contra los tubos.<br/>Combustión incompleta.<br/>Demasiado aceite o muy poco aire, o muy poco vapor de atomización,<br/>o cabezal de quemador dañado.</p> | <p>Llama inclinada.<br/>Llama impacta contra los tubos sobre un lado.<br/>La lanza del quemador se encuentra inclinada o debajo de su posición.<br/>Atomizado deficiente.<br/>Chorro de combustible.<br/>Baja Temperatura de combustible.<br/>Muy poco vapor de atomización.</p> | <p>Chisporroteo<br/>Agua en el combustible.<br/>Combustible sucio.<br/>Combustible frío.<br/>Muy poco vapor de atomización.</p> |

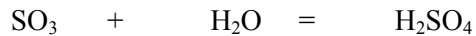
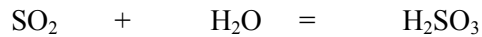
Fuente: Tesis "Estudio y análisis del Proceso de corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo, pag. 24.

#### 2.2.4 Efecto medio ambiental del uso de combustible líquido

Uno de los efectos más importantes y, por desgracia, más comunes de la combustión es la contaminación del aire.

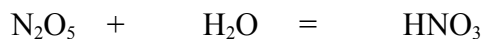
Esta contaminación consiste en la presencia en la atmósfera de una o varias sustancias en tales concentraciones que puedan originar riesgos, daños o molestias a las personas y al resto de seres vivos, perjuicios a los bienes o efectos climáticos:

Los óxidos de azufre,  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ , son los agentes contaminantes más habituales en el aire que proceden de la combustión de los combustibles utilizados en la industria de la refinación del petróleo. El principal peligro que representan son las reacciones químicas a las que dan lugar en condiciones de humedad:



A fin de reducir las emisiones de óxidos de azufre, es preciso eliminar el azufre presente en los combustibles antes de proceder a su combustión. Si ya se ha producido ésta, hay que reducir en los gases de emisión los óxidos de azufre a azufre, el cual puede ser comercializado posteriormente.

Al igual que los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno reaccionan con el agua que existe en la atmósfera y dan lugar a dos sustancias ácidas:



Todas estas sustancias ácidas forman lo que se ha denominado lluvia ácida, que destruye bosques, lagos de escasa profundidad, etc.

A partir de la década de los 80 la gente comenzó a darse cuenta de que los bosques de Europa, Escandinavia y Norteamérica enfermaban y morían marcados por la lluvia ácida. En todo el mundo, los ríos se contaminaban con los productos químicos de la industria:

*“El dióxido de carbono se origina de la combustión de los compuestos orgánicos e incide en el recalentamiento de la atmósfera, fenómeno conocido como efecto invernadero”*

Las plantas toman dióxido de carbono del aire mediante la fotosíntesis y los seres vivos lo expulsan a la atmósfera en la respiración. Durante millones de años, estos procesos han mantenido en equilibrio la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Sin embargo, este equilibrio se ha alterado, por la masiva emisión de dióxido de carbono procedente de las reacciones de combustión de los combustibles fósiles y porque en muchas zonas del planeta la vegetación ha sido destruida en los últimos años. Este exceso de dióxido de carbono en la atmósfera actúa como una pantalla sobre la Tierra, que evita que la energía pueda escapar. La luz visible que llega a la Tierra desde el Sol pierde energía al atravesar la atmósfera terrestre y se transforma en radiación infrarroja. El dióxido de carbono absorbe esta radiación, impidiendo que escape de nuevo al espacio. Este efecto (efecto invernadero) es el responsable de que el hielo de las zonas polares se funda y del aumento de la temperatura media del planeta.

### **3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

El método que se aplicó para ejecutar la presente investigación es un enfoque cuantitativo basado en una investigación experimental ya que se realizan variaciones en variables específicas e independientes y se analiza la influencia en variables dependientes.

Este experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes.

### **4. DESARROLLO DE LA EVALUACION**

#### **4.1. Problemas frecuentes en hornos de proceso cilíndrico verticales**

##### **4.1.1 Ensuciamiento en hornos**

##### **a. Acumulación de cenizas en superficie de los tubos de Zona Radiante y Zona Convectiva**

Aun cuando la superficie extendida de la Zona Convectiva mejora la transferencia de calor, su arreglo físico es susceptible a la acumulación de depósitos de cenizas cuando se quema combustible líquido como el Petróleo Industrial y constituye uno de los principales problemas en el diseño de los tubos de la Zona Convectiva:

Los mayores constituyentes de ensuciamiento, en un Petróleo Industrial son: el azufre, vanadio, sodio, y cenizas, siendo la ceniza, el componente más importante, ya que, el mayor contenido de ceniza significa el incremento directo del rate de deposición.

El rango de viscosidad del combustible influye en la deposición de cenizas. El uso de combustibles de alta viscosidad, y la presencia de

cenizas con partículas más grandes influye en mayor medida al incremento de rate de ensuciamiento de la Zona Convectiva. En la siguiente figura se presenta un ejemplo del grado de ensuciamiento en la Zona Convectiva de un Horno de Procesos:



*Figura N° 4.1:* Ensuciamiento de Zona Convectiva

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 86

### **Zona Radiante**

El ensuciamiento en la Zona de Radiante se presenta en menor medida en comparación a la Zona Convectiva, principalmente con la formación de una delgada capa de ceniza fácilmente removible por medios mecánicos manuales cuando no se forman otros compuestos por la presencia de contaminantes como Vanadio y Sodio principalmente.



El efecto más significativo de ensuciamiento se observa principalmente en los soportes ubicados a lo largo de la cabina de la zona radiante.



*Figura N° 4.2: Ensuciamiento de Zona Radiante*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 452*

#### **4.1.2 Corrosión en hornos**

La corrosión en equipos de fuego directo procede de escenarios distintos, los cuales se producen de acuerdo a las temperaturas de operación:

##### **a. Corrosión por alta temperatura**

La corrosión a alta temperatura, es una forma de corrosión que no requiere la presencia de un electrolito líquido. Conocida también como “corrosión seca” o “escoriamiento” (scaling). En sentido estricto, la

oxidación es la reacción más importante de la corrosión a alta temperatura.

A menudo, en la reacción de oxidación, las aleaciones desarrollan una escama protectora que resiste las distintas formas del ataque por corrosión a alta temperatura tal como sulfidización, carburación, y otras formas de ataque. En general, las denominaciones de los mecanismos de la corrosión son determinadas por los productos dominantes más abundantes de la corrosión, así por ejemplo:

- Oxidación implica los óxidos
- Sulfidización implica los sulfuros
- Sulfidización / oxidación implica los sulfuros mas los óxidos

Los rates de oxidación de las aleaciones se presentan en la siguiente figura:

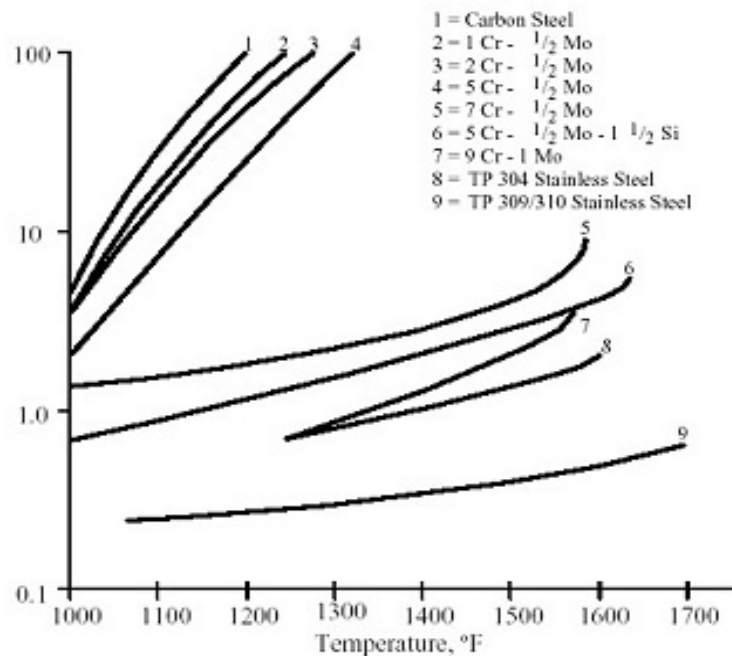
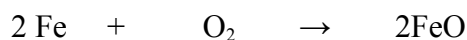


Figura N° 4.3: Rates de Oxidación de las Aleaciones

*Fuente:* Working Guide to Process Equipment, pag. 156.

### **Oxidación**

Se presenta como una reacción química directa entre el metal y el gas agresivo:



Debe considerarse que el Fe puede formar el óxido ferroso- conocido como Wustita FeO, el óxido férrico conocido como hematita - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y la mezcla de los dos óxidos conocida como magnetita- Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Los índices de oxidación de los metales puros son caracterizados mediante cuatro leyes cinéticas básicas: parabólica, logarítmica, cúbica y lineal. Estas leyes son una medida de la velocidad de la oxidación, pues relacionan la variación del espesor de la capa de óxido con el tiempo.

Es importante considerar, que estas leyes están basadas en modelos relativamente simples de oxidación. Los problemas prácticos de la oxidación superan generalmente a las características consideradas en estos análisis simples.

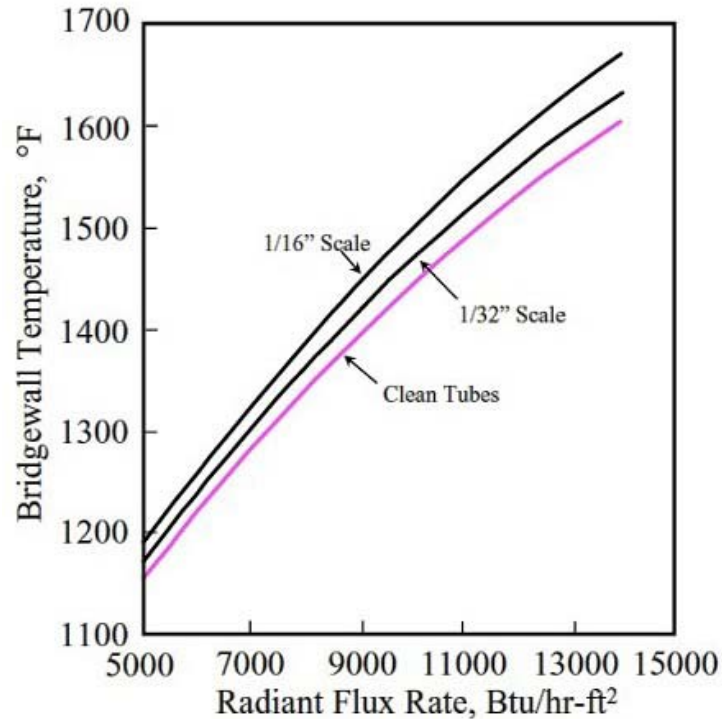
Los metales expuestos a altas temperaturas desarrollan una película de óxido la cual es parcialmente protectora y tiende a retardar la corrosión al incrementarse su espesor.

El Cromo (Cr) es el elemento de aleación más importante para mejorar la resistencia a la oxidación para las diferentes aleaciones comerciales, un mínimo de aproximadamente 18% de Cr es necesario para

desarrollar una escoria protectora de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  para aleaciones de Fe-Cr, así como también pequeñas adiciones de Al y Si a la aleación Fe-Cr pueden mejorar significativamente la resistencia a la corrosión.

El Níquel, es otro elemento que generalmente mejora la resistencia a la oxidación de las aleaciones.

El molibdeno y el Tungsteno son otros elementos que fortalecen a las aleaciones haciéndolas más resistentes hasta temperaturas del orden de los  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  ( $2100\text{ }^\circ\text{F}$ ).



*Figura N° 4.4: Impacto del escoriamiento en el Flujo de Calor*  
*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 3.6*

El efecto de la corrosión dentro de un tubo en un Horno de Proceso, dependerá de la distribución de calor en la cámara de la Zona Radiante. Así, existe una zona caliente del tubo que es la que recibe el

impacto directo o radiación primaria donde se observa el mayor impacto de la corrosión (Figura 4.6) y la zona opuesta a la llama recibe la reradiación donde el impacto de la corrosión es de menor grado (Figura 4.5):

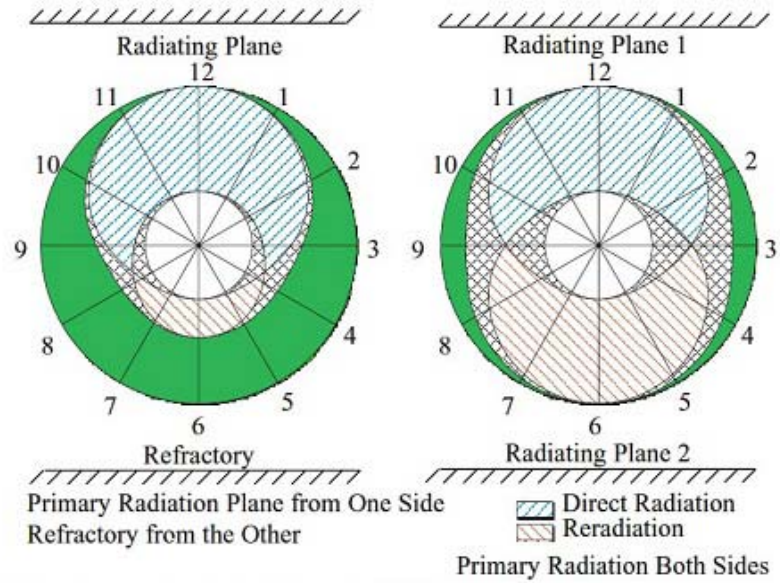


Figura N° 4.5: Distribución de Flujo de Calor alrededor de los Tubos

Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 2.8

■ **Corrosion and Tube Thinning Follows Heater Flux Pattern**

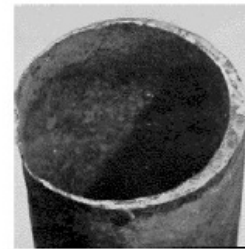
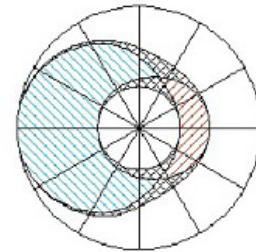


Figura N° 4.6: Zona de efecto de Corrosión en un Tubo

Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 2.10

### Sulfidización o corrosión por H<sub>2</sub>S

La Sulfidización u “oxidación por azufre” es una forma considerablemente más destructiva que la oxidación debido a que las capas de sulfuros tienden a agrietarse y caer más fácilmente que la de los óxidos. El mecanismo básico de sulfidización es casi similar al de oxidación por lo que en un considerable grado, los mismos elementos aleantes que confieren cierta resistencia a la oxidación son útiles para producir la resistencia al ataque por sulfidización.

El rate de corrosión, en función de la temperatura y de la concentración de azufre para diversas aleaciones se presenta en las siguientes figuras 4.7 y 4.8:

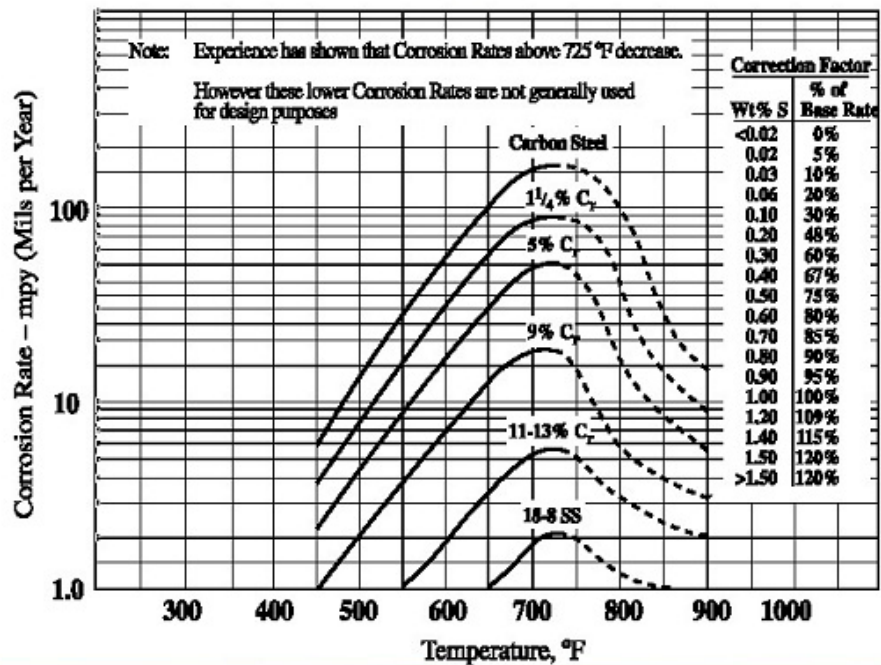


Figura N° 4.7: Rate de Corrosión vs Temperatura en Tubos de Hornos

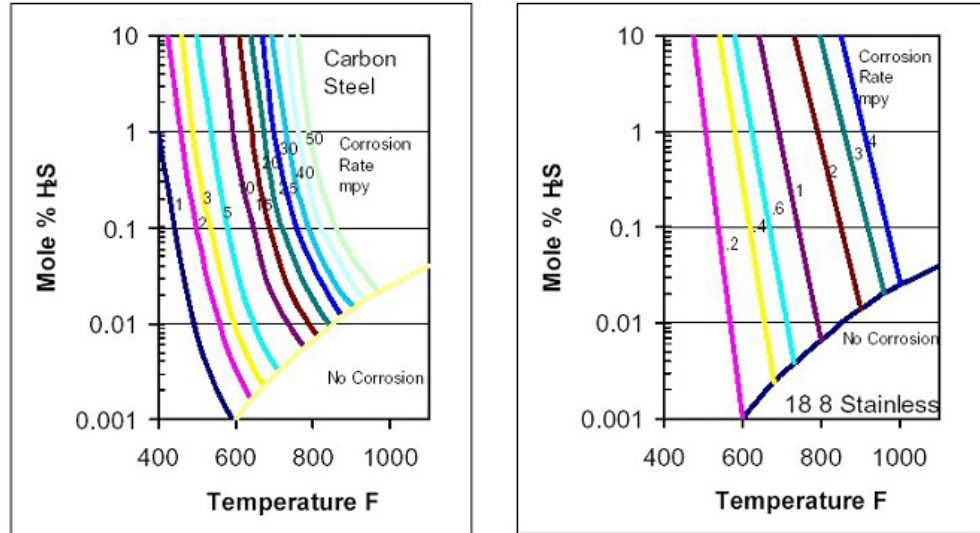


Figura N° 4.8: Concentración de Azufre vs Temperatura en Tubos de Hornos

Fuente: Working Guide to Process Equipment, pag. 210.

El azufre en el combustible reacciona con el oxígeno para formar  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ , una atmósfera de este tipo es generalmente oxidante. Los ambientes oxidantes son usualmente mucho menos corrosivos que los ambientes reductores donde el azufre está en la forma de  $\text{H}_2\text{S}$ . Sin embargo la sulfidización en ambientes oxidantes es frecuentemente acelerada por otras impurezas de combustible tales como Na, K, Cl; los cuales pueden reaccionar entre ellos mismos y/o con azufre durante la combustión para formar vapores de sales. Estos vapores de sales pueden depositarse a temperatura más bajas sobre las superficies del metal, resultando en un ataque de sulfidización acelerado.

En muchos casos los metales y aleaciones cuentan con una escoria de óxido para resistir al ataque de sulfidización; la mayoría de las aleaciones en alta temperatura cuentan con escorias de óxido de cromo. En ambientes oxidante, las escorias de óxidos se forman

mucho más rápidamente debido a las altas actividades de oxígeno. De este modo, la oxidación es probablemente la que domina la reacción de corrosión.

Cuando el ambiente es reductor (potenciales de oxígeno bajos) la reacción de corrosión se convierte en una competencia entre la oxidación y la sulfidización. Así las actividades de oxígeno más bajas tienden a hacer el medio ambiente más sulfidizante, resultando en el dominio de la sulfidización. A la inversa, incrementando la actividad del oxígeno generalmente resulta en ambientes menos sulfidizantes con un dominio de la oxidación. La sulfidización es así controlada por las actividades del azufre y el oxígeno. Cuando la corrosión involucra más de un modo incluyendo la sulfidización, se hace necesaria la selección de materiales especiales.

#### **b. Corrosión por cenizas Fundidas**

##### **Comportamiento de las cenizas del residual**

Las cenizas presentes en los combustibles residuales proceden del crudo de origen y se concentran en las fracciones denominadas residuales que salen por el fondo de la columna, en forma de sedimentos e impurezas metálicas en forma de compuestos organometálicos.

La Tabla N° 4.1 presenta los principales constituyentes de las cenizas en cuanto a su rango de concentración en combustibles residuales y su



proporción en las propias cenizas; el Vanadio representa el elemento de mayor importancia cuantitativa.

Tabla N° 4.1  
Rangos de Composición de Cenizas en Combustibles Residuales

| <b>Constituyente</b>           | <b>Combustibles Residuales (ppm)</b> | <b>Cenizas (%)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 6.0 – 86.0                           | 0.6 – 86.0         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.0 – 76.0                           | 0.3 – 7.6          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.9 – 57.0                           | 0.1 – 5.7          |
| CaO                            | 1.0 – 1.4                            | 0.1 – 1.0          |
| MgO                            | 1.0 – 1.7                            | 0.1 – 0.2          |
| Na <sub>2</sub> O              | 5.0 – 35.0                           | 0.5 – 3.5          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.2 – 1.2                            | 0.0 - 0.1          |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 14.0 – 740.0                         | 0.1 – 74.0         |
| NiO                            | 1.3 – 25.0                           | 0.1 – 2.5          |

*Fuente:* Tesis “Estudio y análisis del proceso de corrosión en Hornos de Proceso de una Refinería de Petróleo”, pag. 32.

Se conoce que el vanadio esta frecuentemente asociado con los asfaltenos en forma de complejos estables, solubles en el combustible. Los combustibles residuales contienen gran variedad de impurezas pero, en relación con la corrosión que se producen en hornos y calderas, son tres los determinantes: Vanadio, Sodio y Azufre. Los Niveles de estos contaminantes en el combustible, en los rangos que originan la corrosión y depósitos se muestran en la Tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2

Rango típico de los principales constituyentes que originan corrosión y depósitos

| Constituyentes | En el Residual     | En las cenizas          |
|----------------|--------------------|-------------------------|
| Vanadio        | 0 – 500 como V     | 0.0 – 4.0 como $V_2O_5$ |
| Sodio          | 2 – 300 como Na    | 0.1 – 30 como $Na_2O$   |
| Azufre         | 1000 – 4000 como S | 0.1 – 40 como $SO_3$    |

*Fuente:* Tesis “Estudio y análisis del proceso de corrosión en Hornos de Proceso de una Refinería de Petróleo”, pag. 33.

Los Sistemas Na-V-S, generan diferentes vanadatos de sodio que tienen diferentes grados corrosivos y cuya formación depende del ratio molar Na/V en el combustible; al aumentar esta relación debe esperarse compuestos mas corrosivos, en razón de formarse compuestos de punto de fusión más bajo, lo cual resulta importante dentro de un rango determinado de temperaturas de operación.

En la Tabla N° 4.3, se muestran los compuestos formados más frecuentes luego de la combustión del combustible. Entre ellos, se distinguen dos tipos, los formadores de escoria y los compuestos de que forman escoria.

Los compuestos formadores de escoria son los causantes de la corrosión por cenizas fundidas, estos tienen un punto de fusión mas bajo y a las elevadas temperaturas de operación en las cámaras de combustión tales compuestos alcanzan un estado cercano a la fusión o

se encuentra parcialmente fundido, por lo cual resulta muy fácil que se adhieran a punto fríos en la cámara de combustión zona de reacción.

Los compuestos que no forman escoria se depositan sobre las superficies de los tubos y paredes ocasionando problemas de ensuciamiento. Al cubrir los depósitos parcialmente los tubos de los hornos disminuyen el área efectiva de transferencia de calor produciendo una disminución gradual de la capacidad y eficiencia.

Algunos combustibles tienen otros componentes metálicos además del sodio y vanadio tales como níquel, cromo y fierro, etc., los cuales podrían estar presentes en cantidades relativamente grandes. Estos metales compiten con el sodio para atrapar el vanadio y al reaccionar con este disminuyen la cantidad de vanadio disponible elevando la relación molar efectiva  $Na/V$  favoreciendo la corrosión. Pero por otro lado pasivan la corrosividad al disminuir la concentración de agentes corrosivos en los depósitos de cenizas.

Tabla N° 4.3  
Punto de Fusión de los depósitos más frecuentes

|   | Formula                  | Punto de Fusión °C/°F     |
|---|--------------------------|---------------------------|
| Compuestos Formadores de Escoria                          |                          |                           |
| Pentóxido de Vanadio                                      | $V_2O_5$                 | 674 / 1245                |
| Sulfato de Sodio  | $Na_2SO_4$               | 879 / 1614                |
| Sulfato de Níquel   | $NiSO_4$                 | 839 / 1542                |
| Meta vanadato de Sodio                                    | $Na_2O.V_2O_5$           | 629 / 1164                |
| Piro vanadato de Sodio                                    | $2 Na_2O.V_2O_5$         | 639 / 1182                |
| Orto vanadato de Sodio                                    | $3 Na_2O.V_2O_5$         | 849 / 1560                |
| Orto vanadato de Níquel                                   | $3Ni_2O.V_2O_5$          | 898 / 1648                |
| Vanadil Vanadato de Sodio                                 | $Na_2O.V_2O_4.5V_2O_5$   | 624 / 1155                |
| Trisulfato de hierro y sodio                              | $Na_3Fe(SO_4)_3$         | 538 / 1000                |
| Gamma Vanadil Vanadato de sodio                           | $5Na_2O.V_2O_4.11V_2O_5$ | 577 / 1070                |
| Eutéctico entre $5Na_2O.V_2O_4.11V_2O_5$ y $Na_2O.V_2O_5$ |                          | 535 / 995                 |
| Compuestos que no forman escoria                          |                          |                           |
| Oxido de Manganeso  | $MgO$                    | 2500 / 4532               |
| Oxido de Aluminio   | $Al_2O_3$                | 2048 / 3718               |
| Oxido de Calcio   | $CaO$                    | 2572 / 4662               |
| Aluminato de Magnesio                                     | $MgAl_2O_4$              | 2135 / 3875               |
| Oxido de Manganeso  | $MnO_2$                  | 1649 / 3000               |
| Oxido de Níquel   | $NiO$                    | 2900 / 3794               |
| Trióxido de Vanadio                                       | $V_2O_3$                 | 1970 / 3254               |
| Tetra óxido de Vanadio                                    | $V_2O_4$                 | 1970 / 3254               |
| Vanadatos de magnesio                                     | $Mgo.V_2O_5$             | 1074 – 1243 / 1965 – 2269 |
| Trisulfatos de Magnesio y Sodio                           | $Na_2Mg_4(SO_4)_3$       | 1126 / 2059               |
| Otros Compuestos  |                          |                           |
| Meta vanadato Férrico                                     | $Fe_2O_3.V_2O_5$         | 859 / 1578                |
| Vanadato Férrico  | $Fe_2O_3.2V_2O_5$        | 854 / 1569                |
| Sulfato de Calcio   | $Ca(SO_4)$               | 1448 / 2638               |

*Fuente:* Tesis “Estudio y análisis del proceso de corrosión en Hornos de Proceso de una Refinería de Petróleo”, pag. 34.

Mecanismo de corrosión por cenizas fundidas

- a. Durante la combustión, los compuestos de vanadio y sodio presentes en el combustible se oxidan en la llama para formar  $V_2O_5$  y  $Na_2O$  ( $Na_2SO_4$ ) en forma de vapor.
- b. Estos vapores se depositan en forma de cenizas que se pegan a las superficies metálicas, en donde el  $Na_2O$  actúa como agente ligante.
- c. El  $V_2O_5$  y el  $Na_2O$  ( $Na_2SO_4$ ) reaccionan sobre las superficies metálicas para formar las sales de puntos de fusión más bajos en estado líquido, siempre que estas superficies se encuentren a la temperatura de fusión de dichas sales.
- d. Los vanadatos formados como se explico en el punto anterior atacan el oxido protector de los metales exponiendo al metal subyacente a la oxidación rápida.

Conforme aumenta la temperatura, el rango de composiciones de  $Na_2O$ -  $V_2O_5$  que forman líquidos se expanden de manera considerable como se muestra en la siguiente figura:

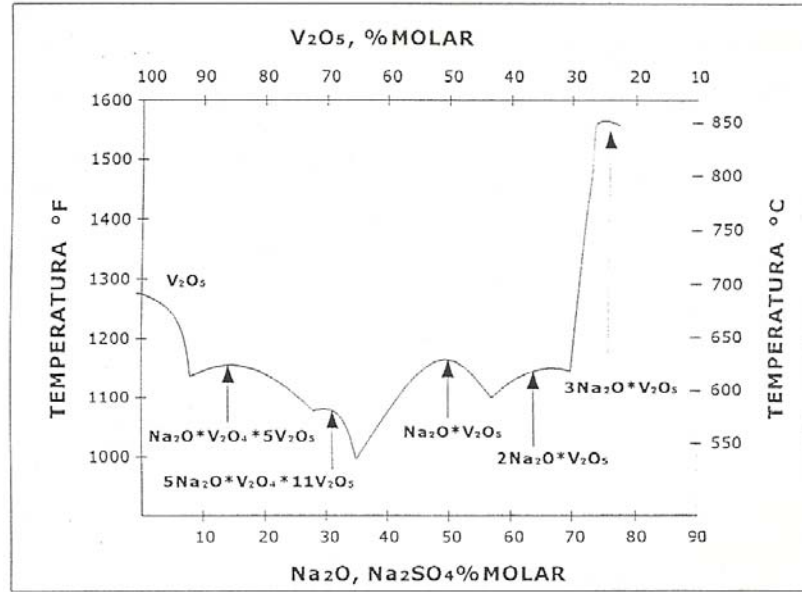


Figura N° 4.9: Vanadatos de Sodio y sus Eutécticos

Fuente: Tesis “Estudio y análisis del proceso de corrosión en Hornos de Proceso de una Refinería de Petróleo”, pag. 36.

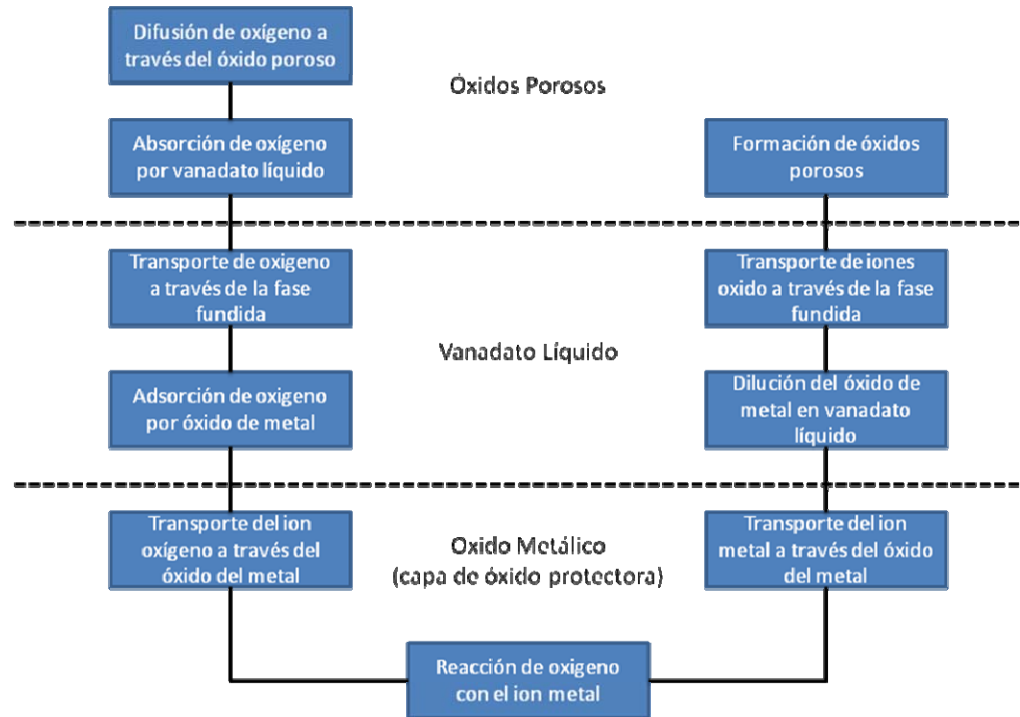
Los productos corrosivos que conforman las cenizas fundidas tienen una facilidad para absorber oxígeno en la interface gas/fase fundida y desorberlo en la interface ceniza fundida/metal; esto es explicable por el fenómeno en el cual las cenizas al pasar del estado líquido al sólido liberan oxígeno y viceversa, produciendo ciclos alternados de oxidación y sulfidización a temperaturas altas.

Para explicar el mecanismo de corrosión por cenizas fundidas será necesario considerar la forma de crecimiento de la capa de óxido y como esta es modificada bajo ciertas condiciones.

Durante la oxidación normal, el óxido crece como una capa coherente, pero en presencia de compuestos fundidos de vanadio, el proceso puede ser bastante diferente.

Los productos de la oxidación son solubles en los compuestos de vanadio y los óxidos son precipitados de la fase fundida luego que esta es saturada.

El mecanismo de corrosión por cenizas fundidas se puede explicar según el esquema siguiente:



Cuando el óxido crece a partir de la fase fundida, este toma la forma de cristales, en vez de películas continuas. Los cristales que crecen en diferentes puntos entran en contacto originando la formación de una capa porosa con la escoria líquida atrapada en la interface metal/óxido. El grado de porosidad depende de la temperatura, solubilidad, tipo de óxido, etc.

Para que el ataque tenga lugar, es necesario que la fase corrosiva de vanadio permanezca en estado líquido, el grado de ataque es controlado por:

- Cantidad de compuestos corrosivos de vanadio en la interface metal/oxido.
- La velocidad de difusión del oxígeno a la interface metal/oxido

La corrosión por cenizas implica siempre una fase fundida que ataca al oxido protector y permite la oxidación por el oxígeno que transporta. Las propiedades de transporte de la fase fundida para generar la oxidación son de naturaleza eléctrica, considerándose que el oxido es reducido en la ceniza líquida.

En condiciones de equilibrio, la etapa controlante (más lenta) del mecanismo de corrosión resulta ser el transporte a través de la fase fundida. Esta capacidad de transporte está determinada por la viscosidad y propiedades conductoras de las cenizas fundidas (conductividad iónica transportando iones oxígeno o semiconductores que incluye transferencia de electrones). Al respecto es importante hacer notar el buen efecto que tiene la adición de sodio al  $V_2O_5$  para aumentar la conducción iónica y disminuir la viscosidad.

Además el  $Na_2SO_4$  en pequeñas cantidades incrementa la oxidación al controlar la fluidez de la escoria fundida a temperaturas bajas, pero actúa como su diluyente a mayores concentraciones y temperaturas. El azufre es de gran importancia en la corrosión por cenizas fundidas,



forma con el sodio los sulfatos alcalinos, los cuales generan los vanadatos por reacción con el pentóxido. Niveles importantes de azufre pueden generar una corrosión por cenizas a temperaturas relativamente bajas.

#### Condiciones para la corrosión por cenizas fundidas

La corrosión por cenizas ocurre principalmente en las siguientes circunstancias;

- Combustible con suficiente nivel de contaminantes que generan ciertos compuestos corrosivos en los depósitos.
- Temperaturas altas en el metal o refractario que permitan la existencia de una fase fundida.
- Materiales refractarios y aleaciones susceptibles al ataque por cenizas.

#### Efecto de temperatura

Los niveles de temperatura necesarias para la corrosión por cenizas están relacionadas con las temperaturas de fusión de las mismas.

La temperatura mínima para la corrosión por cenizas sucede a partir de la formación del compuesto corrosivo de vanadio de menor punto de fusión que es el eutéctico entre el gamma vanadil vanadato de sodio y el meta vanadato de sodio (995 °F/535 °C).

La corrosividad aumenta a mayores niveles de temperatura y conforme la temperatura de los depósitos se eleva, el ratio Na/V no es determinante; el contenido de sodio va perdiendo importancia pues ya

no es requerido para producir una fase fundida, al igual que para disminuir viscosidad y aumentar la conductividad de esta fase, condiciones necesarias para generar la corrosión por cenizas.

El resultado de una corrosión por cenizas fundidas, se observa en la siguiente figura:



*Figura N° 4.10: Corrosión por cenizas fundidas*

*Fuente: Record fotográfico Compañía Hidroquímica.*

#### Materiales susceptibles al ataque por cenizas fundidas

El ataque por cenizas sucede sobre las superficies metálicas y sobre materiales refractarios.

Las aleaciones para alta temperatura pertenecen en su mayor parte al Sistema Fe-Ni-Cr, la capa de oxido protectora fuertemente adherida al metal está conformada por  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  o un complejo  $\text{Cr}_2\text{O}_2\cdot\text{FeO}$  (espinel). Esta es la capa que es atacada para formar sulfuros, principalmente, en alguna etapa del procesos corrosivo.

Su permanencia durante el ataque explica el porqué un material es más resistente al ataque corrosivo que otros; por ello se considera que las aleaciones con mayor contenido de cromo ofrecen mayor resistencia a este tipo de corrosión.

El níquel sufre ataque por sulfuros. Para altos contenido de azufre, no son recomendables aleaciones de níquel.

Se ha demostrado que aleaciones 50/50 o 60/40 Cr/Ni, no sufren ataque por cenizas.

Los refractarios adecuados para el servicio con combustible de alto contenido de contaminantes quedan determinados por tres propiedades que resultan fundamentalmente en su resistencia a la corrosión: Porosidad, Alta densidad y Pureza química.

Los materiales de alta sílice tienen un mejor comportamiento que los de alta alúmina debido a que la sílice aumenta la viscosidad del depósito fundido, evitando la penetración de este.

Fenómeno de creep

Las máximas tensiones admisibles de los materiales disminuyen al aumentar la temperatura. Existe un punto a partir del cual la disminución de su máxima tensión admisible se hace más acelerada y ello es debido al fenómeno de creep.

El fenómeno de creep o fluencia en caliente se caracteriza por un alargamiento continuo y progresivo hasta llegar a la rotura, debido a una tensión constantemente aplicada, interior a la carga de rotura y

asociada a una temperatura elevada, como se muestra en la siguiente figura:



*Figura N° 4.11: Fenómeno de Creep*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 506*

El molibdeno es el elemento más potente como reforzador de la resistencia al “creep” del material base, el siguiente elemento reforzador es el cromo.

El molibdeno mejora la resistencia a la fluencia en caliente o “creep”, esto es, evita que el acero experimente un alargamiento continuo y progresivo como si se tratase de un material plástico, hecho que sucede al cabo de un periodo cuando se encuentra sometido a temperaturas elevadas aunque la tensión que soporte sea relativamente baja.

El Cromo mejora la resistencia a la oxidación frente a la acción de un buen número de agentes corrosivos a través de la formación de una

capa de óxido de cromo adherida a la superficie del metal resistente al fenómeno de escamación.

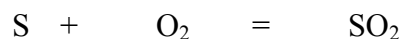
La necesidad de combatir la corrosión dio origen al desarrollo de los aceros aleados al Cr-Mo que ofrecen una buena resistencia al creep y soportan mejor la corrosión por azufre y sulfhídrico.

**c. Corrosión por bajas temperaturas**

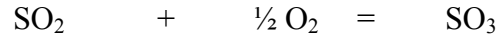
La corrosión en extremo frío o por bajas temperaturas ocurren cuando la temperatura del metal baja por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico de los gases de combustión.

En la mayor parte de los sistemas de combustión, las temperaturas de los gases de combustión varían desde 300 °F (149 °C), en la llama, hasta 800 °F (427 °C) o menos en la chimenea. Este cambio en la temperatura puede causar numerosos cambios físicos y químicos en los componentes de los gases de combustión. Entre los cambios que causan más problemas se encuentran la reacción entre el vapor de agua y el trióxido de azufre para formar ácido sulfúrico.

En general, el problema se asocia al hecho de quemar combustible que contenga azufre o compuestos de azufre. El azufre que se encuentra en el combustible se oxida para formar trióxido de azufre según la reacción siguiente:



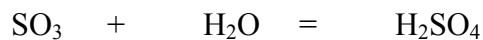
Una fracción pequeña (del 1 al 3%) del bióxido de azufre producido se oxida aun más para formar trióxido de azufre, por reacción directa con el oxígeno atómico que se encuentra en la llama:



También, es posible la oxidación catalítica hacia  $\text{SO}_3$ , si se encuentran presentes óxido férrico, pentóxido de vanadio o níquel:



A medida que se enfrían los gases de combustión, se forma ácido sulfúrico en fase vapor. Si el vapor de ácido sulfúrico hace contacto con una superficie relativamente fría, puede condensarse para formar ácido sulfúrico líquido. La temperatura a la cual se condensa el ácido sulfúrico (punto de rocío del ácido sulfúrico) varía de 240 a 330 °F (116 – 166 °C) o más alto, dependiendo de las concentraciones de trióxido de azufre y de vapor en los gases de combustión:



La corrosión que resulta del ácido sulfúrico sobre las superficies metálicas se denominan “corrosión en el extremo frío”, porque suele presentarse en las regiones más frías del sistema de combustión.

La cantidad de trióxido de azufre y de humedad en los gases de combustión influye sobre la temperatura a la que se alcanza el punto de rocío. Se puede tener corrosión siempre que la temperatura del metal sea menor que el punto de rocío del ácido sulfúrico. Debajo de

este punto de rocío se forma ácido sulfúrico sobre las superficies metálicas y corroe ese metal según la reacción siguiente:



Se logra minimizar la corrosión en el extremo frío al obtener control sobre los factores críticos que la rigen. Los factores críticos incluyen la presencia de cantidades corrosivas de trióxido de azufre en los gases de combustión, la presencia de cantidades excesivas de humedad en los mismos y la presencia de metales cuya temperatura superficial está por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico.

Para evitar la presencia de cantidades corrosivas de trióxido de azufre en los gases de combustión es necesario operar con un exceso de aire del 5% o menos hacia los quemadores, minimizar la infiltración de aire y especificar combustibles con bajo contenido de azufre.

Para eliminar la presencia de cantidades excesivas de humedad en los gases de combustión, es necesario especificar un combustible con bajo contenido de humedad y utilizar el vapor de agua necesario para el soplado de hollín.

### **4.1.3 Otros problemas**

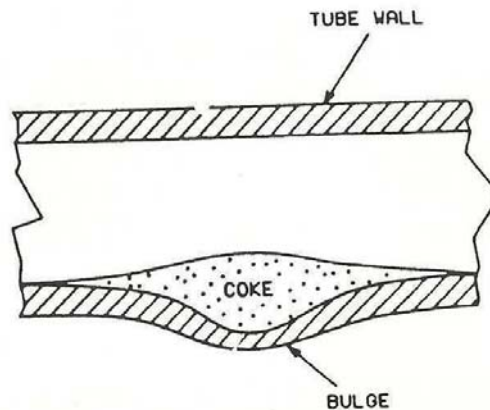
#### **a. Velocidad másica adecuada**

El objetivo, en el diseño de un horno de proceso es de permitir la máxima entrega de calor sin un sobrecalentamiento de los tubos del horno. La causa principal del sobrecalentamiento de los tubos es la localización de depósitos como se muestra en la figura 4.12 y 4.13. El

efecto eventual de tales depósitos de coque es la disminución del espesor del tubo, pandeo y fuga. La razón primaria de la formación de depósitos de coque, es el excesivo flujo calórico sobre una determinada zona y bajo flujo del fluido dentro de los tubos.

Usualmente, las mayores capas de coque se ubican en el punto justo antes del inicio de la vaporización. Esta es la zona de mayor desgaste y máxima temperatura de fluido.

La vaporización y el consecuente incremento en la velocidad lineal y la caída de presión incrementan la fuerza de desgaste del fluido (erosión) sobre la pared del tubo. Sin embargo, a bajas velocidades másicas, las observaciones de campo indican que predomina el flujo anular antes que el flujo turbulento. En el flujo anular, el vapor se desplaza por el centro del tubo y el líquido se arrastra por sobre la superficie.



*Figura N°4.12:* Localización de depósitos por sobrecalentamiento de tubos

*Fuente:* Process Design for Reliable Operations, pag. 137.





*Figura N°4.13: Formación de coque*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 512*

**b. Sobrecombustión en Zona Convectiva**

Si la cantidad de aire en la Zona Radiante no es suficiente para una combustión completa, los hidrocarburos no quemados entran a la Zona Convectiva. Frecuentemente, pequeñas fugas en la estructura de la Zona Convectiva permiten el ingreso de aire dentro del horno y su mezcla con los gases de combustión donde se produce una sobre combustión cerca de los tubos de la Zona Convectiva. Los resultados predecibles son que las superficies extendidas se llegan a oxidar, se da la presencia de masa fundida que inhibe en lugar de promover la transferencia de calor. Para evitar este problema, desde el diseño, se debe de proveer de indicadores de temperatura debajo, en el medio y sobre la Zona Convectiva. Si la temperatura de gases a salida de la

zona Convectiva es mucho mayor que la entrada viene ocurriendo la sobre combustión en una cantidad severa. Sin los indicadores de temperatura se podrá detectar la sobre combustión a través de la presencia de llama por la chimenea.

## **4.2. Factores de diseño y operación que influyen en el ensuciamiento y corrosión**

### **4.2.1 Tiro del horno de procesos**

#### **a. Condiciones de diseño**

La Zona Radiante (cámara de combustión) de un Horno de Procesos opera en vacío, El nivel de vacío, es medido en pulgadas (in) de agua. Una lectura alta de vacío, cerca de los quemadores, está en el orden de 1 in H<sub>2</sub>O. Un valor típico será 0.4 in H<sub>2</sub>O.

El tiro es el resultado de la diferencia de densidades entre el flujo de gases caliente en la chimenea del horno y el aire frío del ambiente. Por lo tanto, cuanto más caliente y mayor altura de la chimenea, mayor será el tiro. Así como se muestra en la siguiente figura:

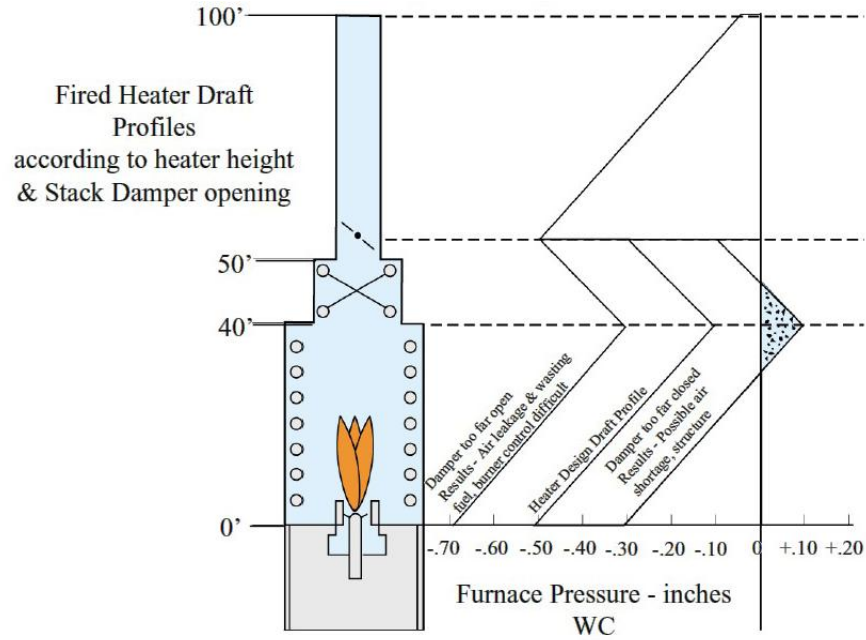


Figura N°4.14: Perfil de Tiro en Hornos de Proceso.

Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 73

## b. Condiciones de operación

La pérdida de tiro puede hacer imposible proveer de suficiente aire para la combustión de todo el combustible que ingresa al horno. La concentración de oxígeno en los gases de combustión será cercano a cero, la cantidad de monóxido de carbono se incrementará significativamente. Si el Horno utiliza Petróleo Industrial como combustible, la chimenea emitirá humo negro. Algunas de las causas comunes de bajo tiro son:

### a. Ensuciamiento de Zona Convectiva

Para hornos que queman Petróleo Industrial y tienen aletas como área extendida, el ensuciamiento reduce el tiro. Una pérdida gradual de tiro posiblemente signifique que la Zona Convectiva

requiere de limpieza externa. Los depósitos del combustible quemado tienden a acumularse sobre la superficie lo suficiente como para restringir el paso de los gases de combustión; el incremento de la caída de presión a través de la Zona Convectiva reduce el vacío en el Horno. Es importante la instalación de Sopladores de Hollín como una respuesta a este problema.

b. Fuga en ductos y superficie del cilindro

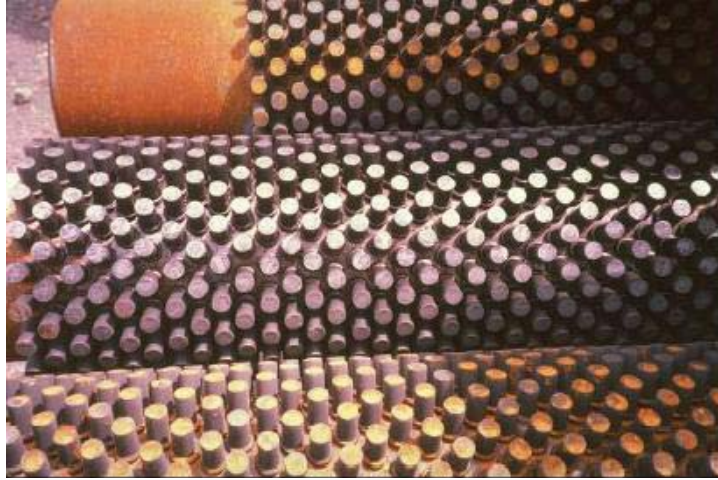
La Caja Radiante, Zona Convectiva y ductos operan bajo vacío, conexiones en ambas zonas pueden permitir el ingreso de aire frío a la corriente de los gases de combustión. La presencia de aire reduce el tiro a través del enfriamiento de los gases de combustión en la Zona Convectiva y el incremento de la caída de presión debido al incremento de volumen de gases en la chimenea.

#### **4.2.2 Tipo de tubos en Zona Convectiva**

**a. Tubos aletados vs tubos entetonados**

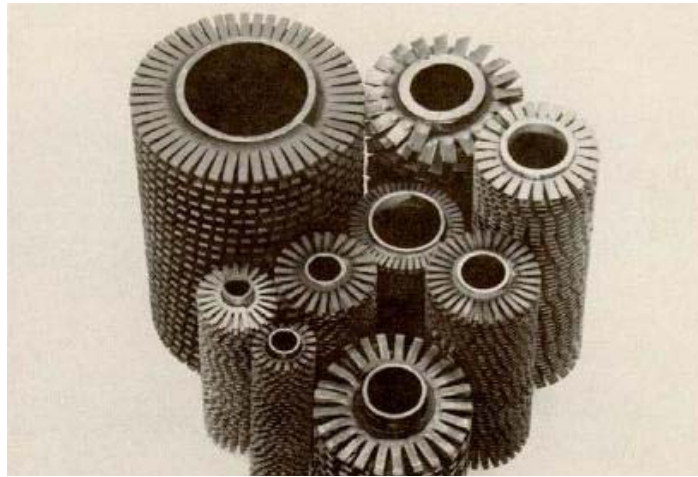
Si el combustible utilizado en el horno es un combustible líquido con cantidades considerables de sedimentos, vanadio y sales, los tubos de la zona convectiva deberán ser entetonados y no aletados. Los tubos entetonados poseen superficies cilíndricas soldadas a la superficie del tubo cuya limpieza y retiro de depósitos entre “studs” es más fácil que la limpieza con tubos aletados. Un tubo entetonado tiene, además, una resistencia mucho más fuerte que los tubos aletados. A continuación

se muestran los tipos de superficies extendidas para la Zona Convectiva:



*Figura N° 4.15a:* Superficie extendida tipo “Entetonado”

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.4



*Figura N° 4.15b:* Superficie extendida tipo “Aletas Segmentadas”

*Fuente:* UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.4



*Figura N° 4.15c: Superficie extendida tipo “Aletas Continuas”*

*Fuente: Honeywell Company. Fired Heaters 2008, pag. 4.3.*

### **4.2.3 Vapor de deshollinado en la Zona Convectiva del horno**

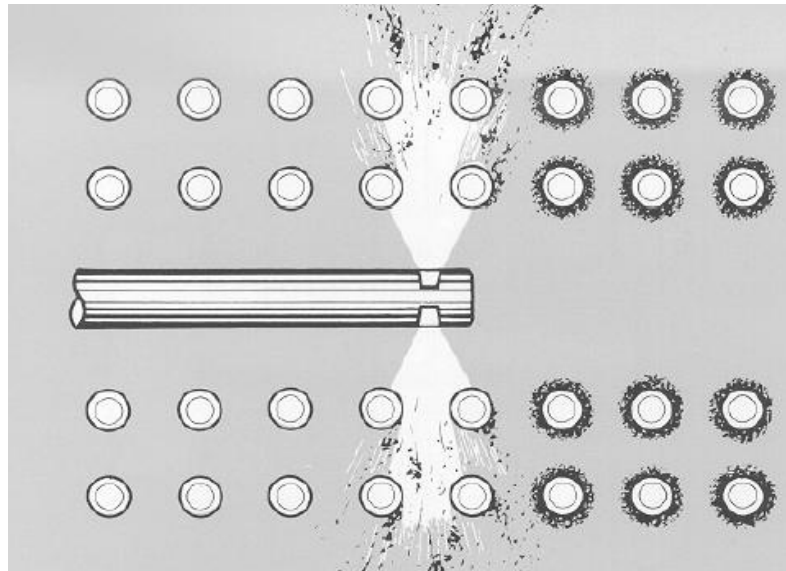
#### **a. Condiciones de diseño**

Para mantener la máxima eficiencia térmica en el Horno de Procesos, es necesario mantener limpia el área de transferencia de la Zona Convectiva. Aún cuando la superficie extendida de la Zona Convectiva mejora la transferencia de calor, su arreglo físico es susceptible a la acumulación de depósitos de ceniza cuando se quema combustible Petróleo Industrial.

Para la limpieza de la Zona Convectiva, el método más efectivo es el uso de deshollinadores con vapor (figura 4.16). La efectividad en la limpieza de un deshollinador y del vapor de deshollinado depende de la orientación de la lanza del deshollinador, la temperatura de los gases de combustión, el arreglo de la superficie de calentamiento y la presión de deshollinado. Como una guía general, la capacidad de deshollinado

vertical de un deshollinador fijo rotativo no excede 3 filas de tubos hacia arriba y 3 filas de tubos hacia abajo y un radio de deshollinado horizontal de 3.5 pies. Para un deshollinador retráctil, se puede cubrir 4 filas de tubos arriba y abajo y un radio de 4 pies.

El consumo de vapor para una lanza retráctil varía entre 8,000 y 12,000 lb/hr dependiendo de la presión en las boquillas con un tiempo de acción de 2 ½ minutos. Una lanza fija consume vapor en un rango de 10,000 y 14,000 lb/hr con un tiempo aproximado de deshollinado de 40 segundos. Los deshollinadores son accionados normalmente una vez cada 8 horas:



*Figura N° 4.16: Acción de deshollinadores*

*Fuente: UOP Honeywell Company. Fired Heaters 2007, pag. 570.*

El vapor de deshollinado proviene normalmente de la línea de suministro de vapor a relativas bajas presiones de 150 y 200 psig. Por debajo de los 150 psig, el deshollinado es virtualmente no efectivo. A

mayor presión (presiones de 400 – 600 psig), el deshollinado es más efectivo.

**b. Condiciones de operación**

Las condiciones de operación pueden determinar la efectividad del deshollinado basado en el cumplimiento o variación de las condiciones de presión y/o flujo del vapor, la frecuencia de deshollinado en función de la calidad del combustible que se utiliza o de variaciones en el tiro del horno que dificulte el correcto deshollinado.

Para ello, es importante la participación de la ingeniería de contacto que permita mantener las condiciones de operación adecuadas vía el análisis de las condiciones de diseño, análisis estadístico de tendencias y la aplicación de nuevas tecnologías y/o métodos experimentales.

**4.2.4 Influencia del vapor de atomización en la formación de incrustaciones en los tubos del horno**

**a. Condiciones de diseño**

Cuando se utiliza Petróleo Industrial como combustible en un horno de proceso, se deben tener consideraciones especiales debido a que la mezcla con el aire se realiza en fase gaseosa. Para ello, se utiliza medios de atomización para romper la masa del combustible líquido en micro gotas que luego entran en contacto con el aire para producir la combustión.



El medio de atomización más usado es el vapor. Para una adecuada combustión del combustible, se debe de considerar los siguientes aspectos referido al vapor de atomización:

- La presión de vapor debe ser más alta que la presión del combustible al ingreso del quemador.
- La presión del combustible líquido debe mantenerse constante, típicamente mínimo a 75 psig (depende de la marca del quemador y de la capacidad de liberación de calor con que trabaja el quemador).
- El vapor enviado al quemador debe ser vapor seco o ligeramente sobrecalentado.
- El diferencial de presión entre el vapor de atomización y el combustible deberá mantenerse de acuerdo a lo requerido por las especificaciones del quemador. Típicamente el diferencial de presión es de 30 psig.

**b. Condiciones de operación**

Las principales variables que un operador debe tomar en consideración durante la operación son:

- Presión del combustible a la entrada del quemador (cabezal). El control de esta variable se realiza controlando la presión de retorno de combustible.
- Diferencial de presión entre combustible y medio de atomización, que incluye el control de presión de vapor.

- Garantizar la calidad del vapor.

Para ello es necesario contar principalmente con la instrumentación adecuada y necesaria.

## 5. PROPUESTA DE MEJORAS PARA MINIMIZAR EFECTOS DEL ENSUCIAMIENTO Y CORROSION DE HORNOS DE PROCESO

### 5.1. Uso de aditivos

#### 5.1.1 Aditivo mejoradores de la combustión (combustible líquido)

Aditivos que actúan como catalizadores de la combustión que facilitan la reacción del carbono con oxígeno durante la combustión. El fierro y el Cerio son reconocidos como catalizadores efectivos para ser usados en aplicaciones de combustión de destilados pesado o Petróleos Industriales. Los metales considerados como catalizadores mejoradores de la Combustión, son: Hierro, Cerio, Magnesio, Calcio, Bario, Platino, Solventes Orgánicos, MMT, etc.

El metal más representativo, como promotor de combustión es el Cerio, este aditivo actúa sobre la cinética de oxidación, la velocidad de oxidación se incrementa significativamente (x 20). Así, por ejemplo, La adición de Cerio al combustible incrementa el número de sitios catalíticos pero no afecta la energía de activación global debido a la presencia de otros metales en el combustible.

El aditivo más utilizado contiene nano partículas de óxidos de cerio dispersas en un solvente orgánico para promover la miscibilidad con los combustibles.

La dosificación de este aditivo dependerá de la naturaleza y severidad del problema, la inspección visual permite una rápida indicación para una rápida optimización del sistema con bajo gasto de aditivo adicional. El

uso de un catalizador de combustión tendera a reducir el hollín de los equipos de combustión.

### **5.1.2 Aditivo post combustión (combustible líquido)**

Estos aditivos a base de magnesio utilizados para post combustión debido a su capacidad de evitar la formación de slags (costras) en la cámara de combustión en Zonas Radiantes y Convectivas en hornos de proceso. Así mismo el aditivo evita el efecto catalítico del vanadio en la oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , el que luego pasara a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  generando corrosión por los gases de chimenea.

Se conocen muchos metales por su capacidad de catalizador en los combustibles de hidrocarburos. Estos metales incluyen el magnesio, fierro, cobre, bario, cerio, calcio y platino. En el caso del magnesio, por ejemplo, interfiere con la acción catalizadora del Vanadio; el fierro es usado para catalizar la formación de trióxido de azufre que lleva a la formación de ácido sulfúrico, lo cual permita usar combustibles con alto contenido de azufre; El cobre, bario y calcio son menos efectivos; el Cerio y Platino presentan el problema de alto costo.

#### Mecanismo del Catalizador

El efecto del catalizador en base a fierro y magnesio proviene de la excitación de electrones de la última capa hacia estados más elevados de energía, cuando estos electrones decaen hasta la degeneración, la energía liberada mantiene la energía de activación necesaria para la reacción aun cuando la temperatura de reacción este por debajo que la temperatura

requerida. Se deben considerar dos factores importantes: el catalizador, mientras que este en solución en el combustible y considerado como homogéneo en ese estado, este pasa a ser un catalizador heterogéneo en la fase de combustión. Un factor importante es que el catalizador no reduce la energía de activación de la reacción, el efecto más probable es la liberación de energía para mantener la energía de activación durante condiciones de temperaturas bajas en la combustión, de tal manera que la reacción continua hasta completarse.

De acuerdo a los resultados de investigaciones realizadas y la data recogida de las diversas aplicaciones, se observa que el uso de estos aditivos reduce significativamente las emisiones y simultáneamente incrementan la eficiencia del combustible teniendo implicancias directas en las condiciones ambientales y la económica del combustible.

Comercialmente la dosis aplicada en un combustible dependerá de la composición del combustible, la composición del aditivo, las condiciones de operación y mezcla.

## **5.2. Mejoras en control de variables operativas**

Para obtener un comportamiento adecuado del horno minimizando y controlando entre otros, variables que eviten el ensuciamiento de Hornos de Proceso, se requiere el monitoreo constante de ciertas variables del proceso y de la combustión:

- **Consumo de combustible:** El consumo de combustible es normalmente controlado por la temperatura de salida del producto. La medida de consumo

de combustible permite determinar directamente el calor liberado, la eficiencia del equipo y con ello posibles problemas de mala combustión y ensuciamiento.

- **Temperatura de flujo de gases de combustión:** La medida de la temperatura de los gases de combustión que salen de la Zona Radiante (Zona Brigdewall) sirve como una referencia del balance térmico en la caja radiante y también como un indicador de las condiciones de sobre combustión.

El Balance en este punto es importante porque la recuperación de calor se realiza de un 75 a 80% en la zona radiante, por lo que se debe buscar inicialmente contar con la mayor eficiencia en esta zona del horno.

Esta temperatura debe ser, también, monitoreada a la entrada de cada serpentín de la Zona Convectiva y a la salida de toda la Zona Convectiva ya que provee una indicación de la eficiencia de esta parte del equipo y el grado de ensuciamiento de los tubos.

- **Perfil de tiro:** La medición del tiro debe ser realizada en la caja radiante, cerca del nivel de los quemadores, a la entrada y salida de la zona convectiva, y antes del dámper en la chimenea.

La medición del tiro provee información de la caída de presión del aire de combustión y los gases de combustión. Esta información es necesaria para el ajuste de la entrada de aire en el quemador y la posición del dámper en la chimenea. Las lecturas de tiro también indican cuan cerca está el horno de sus condiciones límites de operación.

### 5.3. Cambio de combustible

De acuerdo a la coyuntura actual del país y el cambio de matriz energética en el Perú, se viene observando un crecimiento fuerte en la tendencia a cambio de combustible de las industrias, que además de solucionar muchos problemas de ensuciamiento y corrosión mencionados en el presente trabajo, son una alternativa para reducir costos, mantenimiento inalterable el flujo de calor requerido o superando este requerimiento en algunos casos. Asimismo, hasta antes de las obligaciones del Protocolo de Kioto el cambio de combustible era netamente buscando la ventaja económica, procurando no alterar el producto final.

De acuerdo al enfoque del presente trabajo, existen factores adicionales, que a continuación se mencionan tomando en consideración la ubicación de las refinerías existentes en los diversos lugares del territorio Peruano:

- Inaccessibilidad a una fuente proveedora de Gas Natural: Las refinerías ubicadas en la Selva del Perú (Refinería Iquitos), no cuentan con acceso a una fuente para el desarrollo de alguna propuesta de cambio de combustible, por ello, es importante la aplicación del tratamiento contra corrosión y ensuciamiento.
- Coyuntura de consumo de Gas Natural en Perú: Refinerías ubicadas en la capital (Refinería Pampilla y Refinería Conchán), vienen realizando la inversión para el uso de gas natural, principalmente como combustible en hornos de proceso. Sin embargo, el consumo del mismo, está siendo limitado por razones de capacidad del sistema de distribución.

- Dificultades y costos altos de fuentes alternativas: La Refinería ubicada al norte del País (Refinería Talara), mantiene un contrato de suministro de Gas con dificultades para mantener contratos de largo plazo y la variación de consumo de acuerdo a las necesidades de la refinería, por ello, en este caso particular, se plantea del cambio de combustible de Gas al uso de Petróleo Industrial o combustible pesado para su uso como combustible en los Hornos de Proceso.



## **6. PROPUESTA DE METODOLOGIA DE MONITOREO Y CONTROL DEL ENSUCIAMIENTO Y CORROSION**

La presente Metodología de Monitoreo y Control tiene como objetivo establecer actividades a realizar en una Refinería como parte de las actividades de Ingeniería de contacto en Hornos de Proceso tipo Cilíndrico Vertical.

Las Refinerías de Petróleo, cuentan con un área de Ingeniería de Procesos con la principal función del control y verificación de los parámetros de operación de las diversas unidades de proceso, por ello esta metodología puede ser aplicada como parte de las labores de ingeniería de contacto como una labor recurrente, esto considerando que cualquier periodo que no se realice un monitoreo de la operación de estos equipos, puede representa un periodo de disminución de eficiencia y el consecuente consumo de combustible.

La evaluación recurrente permita obtener buenos resultados de manera sostenida para mejorar la operación de estos equipos con resultados como: menor consumo de combustible, disminución del régimen de ensuciamiento del equipo y tiempos más prolongados de operación de los equipos:

### ***Metodología para Control de eficiencia, corrosión y Ensuciamiento de los Hornos de Proceso***

El control de eficiencia, corrosión y ensuciamiento de los hornos, se realizara a través de la determinación de la eficiencia de los Hornos de UDP y UDV (mantener como mínimo 75% de eficiencia), que incluye el análisis de los siguientes parámetros de manera recurrente dentro de las labores de ingeniería de contacto:

- Consumo de combustible

- Temperatura de la zona de escudo (Bridgewall)
- Calor ganado por el crudo
- Composición de los gases de chimenea
- Tiro del Horno
- Caída de presión del crudo en el Horno

La frecuencia de análisis de las variables se encuentra detallada en el Anexo N° 1.

Como referencia de la propuesta de la presente metodología, se ha realizado la evaluación de un Horno de Proceso tipo Cilíndrico Vertical de Refinería Conchán – PETROPERU, por el periodo de una semana, para poder abarcar el monitoreo diario y semanal. Las corridas de pruebas consideran esquemas específicos y puntuales que en el presente trabajo no se ha considerado analizar. Los datos se encuentran detallados en el Anexo N° 2.

Es preciso mencionar que este programa debe realizarse de manera rutinaria para garantizar un control adecuado del consumo de combustible, que representa el costo operativo más alto dentro de una refinería.

Los principales resultados obtenidos fueron:

- Un adecuado control de las variables operativas permite obtener beneficios directos en la reducción del consumo de combustible en los Hornos de Proceso.
- Es importante contar con los equipos e instrumentación adecuada para poder realizar el monitoreo ya que se debe de evaluar el comportamiento de todas las variables en su conjunto y descartar falla del instrumento que ocasionaría lecturas erróneas en el sistema.

- Asimismo, es importante contar con instrumentación electrónica que permita una mejor recolección de data, para este trabajo, se considera además la utilización de un analizador de gases en línea para determinar el % exceso de oxígeno.
- La variación de consumo de combustible registrada promedio es de 0.2 GPM por horno.
- La caída de presión, temperatura de zona Bridgewall se mantienen constantes a lo largo de la evaluación.
- En los Hornos de Refinería Conchán, existe una limitación en la Zona Convectiva, que se refleja por los niveles altos de temperatura de los gases de chimenea, por lo que el ahorro a obtener con un cambio a mediano plazo puede determinar que se llegue a niveles de 80% de eficiencia en conjunto en los Hornos de Proceso de Operaciones Conchán.
- Con una eficiencia de 80%, se conseguiría una reducción promedio de 0.35 GPM.

## 7. EVALUACION ECONOMICA

### 7.1. Uso de aditivos

Consideraciones para el análisis económico

- El consumo de aditivo dependerá de la calidad de combustible que se utilice y de las condiciones de operación que se tenga en los equipos, para el presente análisis se ha considerado la evaluación tomando como base el uso de Petróleo Industrial N° 6, con calidad típica de una refinería local.
- El objetivo de este aditivo promotor de combustión, es contar con mínimo 100 ppm de fierro en la boquilla del quemador.
- Para el análisis del aditivo, se toma como referencia la calidad de un proveedor del medio (Baker Petrolite).
- La evaluación económica toma como referencia los resultados obtenidos en el estudio realizado en los mismos Hornos de Procesos de Refinería Conchán; para la presente evaluación económica, los datos de referencia utilizados corresponden de la Tesis “Estudio y Análisis del Proceso de Corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo” se encuentran en el Anexo N° 3.
- La data descrita en el Anexo N° 3, permite concluir que la mejora en los rates de corrosión y de las características de las cenizas que se forman, va a permitir reducir la frecuencia de limpieza principalmente de la zona Convectiva, cuyo gasto se cuantifica. Asimismo, las cenizas formadas origina capas aislantes sobre los tubos, con la nueva característica de las mismas con el uso de aditivo, se asume un incremento mínimo requerido para la justificación de la presente propuesta y su posterior aplicación.

- Se considera el mismo escenario de mejoras para el uso de aditivos promotores de combustión y post combustión.

#### Resultados de la Evaluación

En el Anexo N° 4, se encuentra detallado la evaluación económica. Los principales resultados son:

Aditivo promotor de combustión:

Ahorro: 57.78 MUS\$/año

Aditivo post combustión:

Ahorro: 68.82 MUS\$/año

### **7.2. Mejoras en el diseño y en control de variables operativas:**

Consideraciones para el análisis económico

- Actualmente las refinerías no cuentan con personal propio para cubrir todas las demandas de desarrollo de ingeniería e implementaciones de mejoras, por lo que se considera un costo de personal especializado.
- Los datos para la evaluación económica se obtienen del análisis descrito en el Anexo N° 2 como resultado del programa de Monitoreo.
- En el Anexo N° 4, se encuentra detallado la evaluación económica. Los principales resultados son:  
Ahorro: 239.57 MUS\$/año

### **7.3. Cambio de combustible**

Consideraciones para el análisis económico:

- La evaluación de cambio de combustible depende de la evaluación de cada refinería, como referencia se muestra el análisis económico realizado por Refinería Conchán para el cambio de combustible respectivo.
- En el Anexo N° 4, se encuentra detallado la evaluación económica. Los principales resultados son:

VAN al 12%: 3,662.90 MUS\$

TIR: 48.7%

Payout: 2.5 años

## 8. CONCLUSIONES

1. El presente estudio ha demostrado que existen factores de diseño y de operación que influyen en la corrosión y ensuciamiento de Hornos de Proceso tipo Cilíndrico Vertical incidiendo principalmente en la eficiencia térmica del horno y en el consumo de combustible que afectan directamente el costo operativo de la planta así como el efecto medioambiental que produce por baja eficiencia de operación.
2. Los factores de diseño y operación son:  
Factores de Diseño:
  - Tiro del horno de procesos
  - Tipo de tubos en zona convectiva
  - Velocidad másica adecuada
  - Sobre combustión en Zona ConvectivaFactores de Operación:
  - Frecuencia de deshollinado
  - Operación del vapor de atomización
  - Uso de combustibles
  - Control de variables de proceso
3. Considerando los costos de inversión de cada propuesta, se observa que un mejor seguimiento en las condiciones de operación de los Hornos de Proceso puede generar un retorno económico significativo a la empresa, y que en muchos casos está enfocado principalmente a obtener la información técnica necesaria para el análisis correspondiente.

4. El cambio de combustible, para una Refinería representa un ahorro significativo en el mayor porcentaje del gasto del Presupuesto Operativo (consumo de energía), y siguiendo las tendencias mundiales es necesario buscar las mejores alternativas, de acuerdo a los escenarios de producción y de servicios para el uso de este recurso energético.
5. Los cambios de matriz energética del país, el continuo objetivo de reducir costos operativos y la búsqueda de la eficiencia energética ligada a la necesidad de generar menor cantidad de gases contaminantes, obligan a las refinerías a buscar el combustible adecuado en función a las necesidades y alternativas del mercado
6. Se puede concluir que la existencia de diversos tipos de aditivos, permite mejorar la performance de la operación de los equipos, sin que este represente un alto costo de adquisición ni de mantenimiento.
7. La presencia de contaminantes en el combustible, principalmente de metales (Vanadio, Sodio) pueden dar una referencia de la presencia de Corrosión por cenizas fundidas, que dependerá de la calidad del combustible principalmente de de la viscosidad y del contenido de metales, para ello, es necesario realizar evaluaciones de pruebas de laboratorio y de campo para determinar el tratamiento óptimo con mayor retorno económico. La presencia de cenizas con alto contenido de Vanadio y Sodio, se considera un paso previo para la formación de cenizas fundidas.
8. Los contaminantes en el combustible producen cenizas y depósitos afectando principalmente la Zona Convectiva incidiendo negativamente en la transferencia de calor y acelerando el proceso de oxidación de los mismos.



## **9. RECOMENDACIONES**

1. Las Refinerías de Petróleos, dentro de su organización, es recomendable contar con un adecuado programa de Ingeniería de Contacto para los equipos principales, ya que el control de los mayores gastos operativos se reflejan en un adecuado control de consumo de energía y producción de determinados productos. El 80% de los problemas, se resuelve atacando el 20% de fuentes.
2. De acuerdo a las alternativas y tecnologías de sistemas de combustión, es recomendable mantener sistemas duales que permitan contar con sistemas alternos en los equipos de generación de calor y poder reaccionar con rapidez a las variaciones y dificultades de obtención de combustible.
3. Es recomendable la implementación de un programa para la prueba de nuevos productos (aditivos) del mercado a nivel laboratorio y de Planta que permitan mejorar las condiciones de operación en estos equipos.

## 10. BIBLIOGRAFIA

Lieberman, N. (1984). Process Design for Reliable Operations (2da Edición). Texas: Gulf Publishing Company.

Lieberman, N. & Lieberman, E. Working Guide to Process Equipment (2da Edición). Texas: McGraw Hill.

Lieberman, N. (1991). Troubleshooting Process Operations (3ra Edición). Tulsa, Oklahoma: PennWell Books.

Trinks, W. & Mawhineey, M (1971). Hornos Industriales (1era Edición). España: Urmo.

Berman, H. (1978). Fired Heaters – I / II / III / IV. Caltex Petroleum Corp: Chemical Engineering.

Jr. Baukal, C. (2001). The John Zink Combustion Handbook. Tulsa Oklahoma

UOP Honeywell Company (2007). Fired Heaters Introduction. Lima

UOP Honeywell Company (2008). Fired Heaters: Improving Safety, Reliability and Profitability. CAREC: Lima

UOP Honeywell Company (2008). Fired Heaters. CAREC: Lima.

Norma Técnica Peruana de Combustibles Líquidos (2000). Lima.

Chileno, F. & Ramírez, J. (2005). Estudio y Análisis del Proceso de Corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo. Universidad Nacional de Ingeniería.

## **11. ANEXOS**

Anexo N° 1: Frecuencia de Control y Monitoreo de Variables

Anexo N° 2: Resultados de Monitoreo de Variables de Proceso del Horno de Proceso

Anexo N° 3: Datos de referencia de la Tesis “Estudio y Análisis del Proceso de Corrosión en Hornos de una Refinería de Petróleo

Anexo N° 4: Evaluación Económica de las Alternativas de Solución

## ANEXO N° 1

## FRECUENCIA DE CONTROL Y MONITOREO DE VARIABLES

| <i>PROGRAMA</i>                                      | <i>FRECUENCIA</i> |                |                |                           |
|--|-------------------|----------------|----------------|---------------------------|
|  | <i>Diaria</i>     | <i>Semanal</i> | <i>Mensual</i> | <i>Corridas de Prueba</i> |
| <i>Control de operación eficiente en los equipos</i> |                   |                |                |                           |
| - Consumo de combustible                             | X                 |                |                | X                         |
| - Temperatura de la zona de escudo (Bridgewall)      | X                 |                |                | X                         |
| - Calor ganado por el crudo                          | X                 |                |                | X                         |
| - Composición de los gases de chimenea               |                   |                | X              | X                         |
| - Tiro del Horno                                     |                   | X              |                | X                         |
| - Caída de presión del crudo en el Horno             | X                 |                |                | X                         |

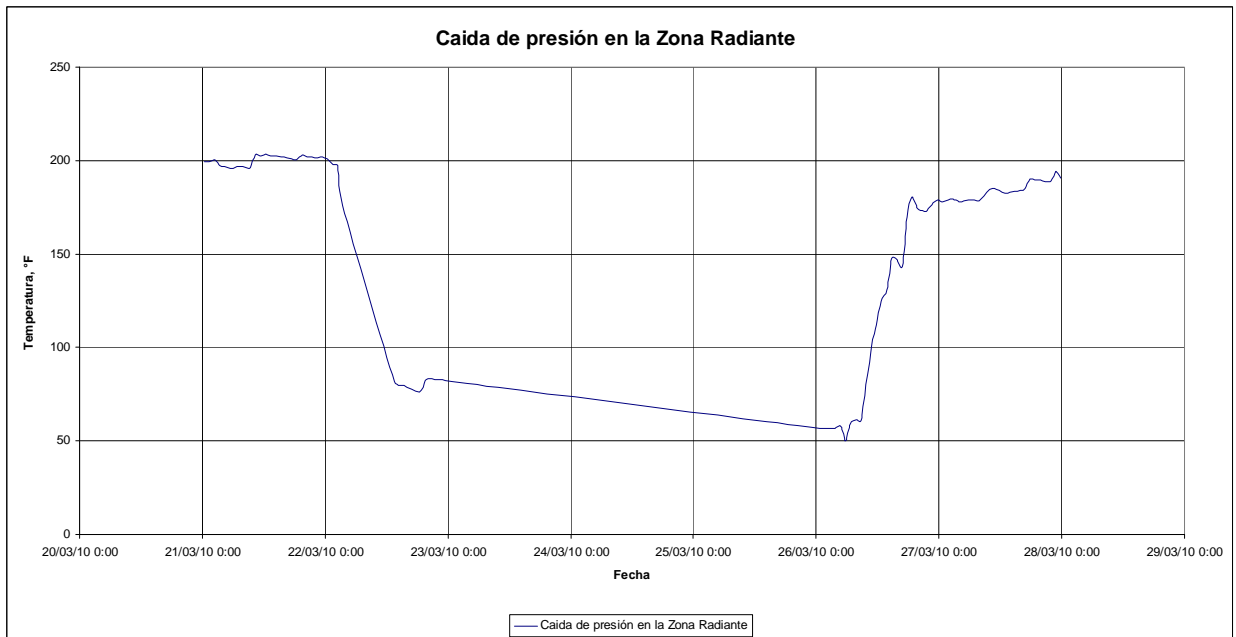
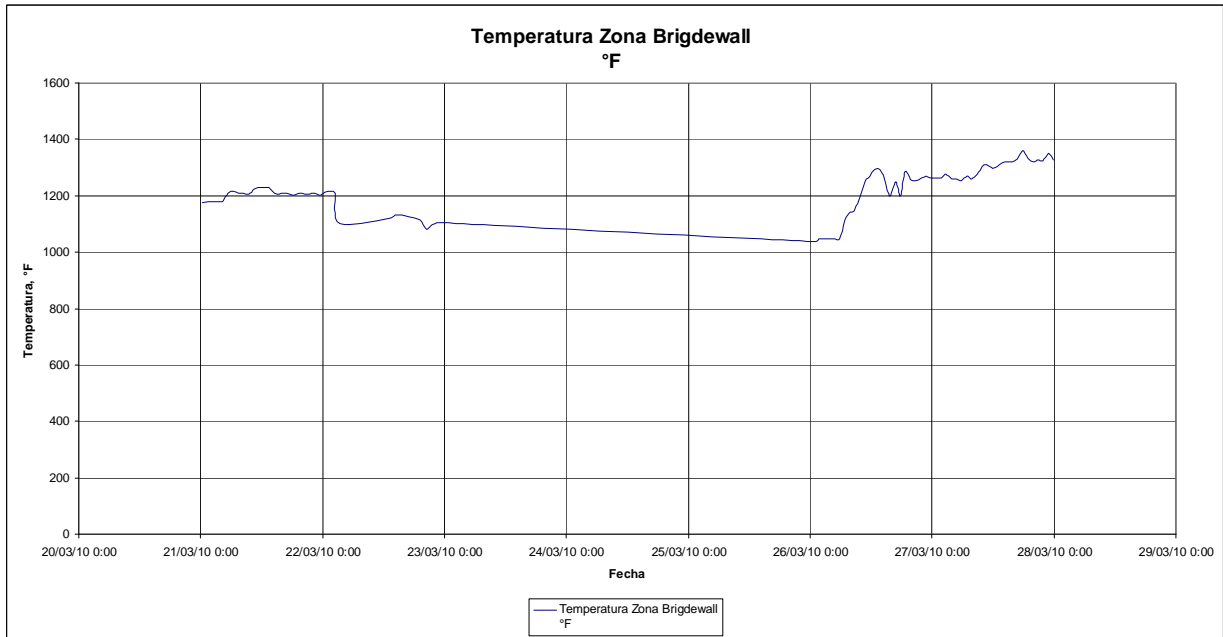
## ANEXO N° 2

## RESULTADOS DE MONITOREO DE VARIABLES DE PROCESO DEL HORNO

## DE PROCESO F-1 DE LA UNIDAD DE DESTILACION PRIMARIA

| Fecha          | FT-131<br>Flujo de Combustible<br>GPM | FT-101<br>Carga a Horno F-1<br>BPD | TT-259<br>Temperatura Ingreso Z.<br>Convectiva<br>°F | TT-1<br>Temperatura Salida Z.<br>Radiante<br>°F | Atemperatura de<br>Crudo | TT-9409<br>Temperatura Zona<br>Briggdewall<br>°F | TT-9410<br>Temperatura Chimenea<br>°F |
|----------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|---|--------------------------|--|---------------------------------------|
| 21/03/10 0:24  | 2.17                                  | 11706                              | 527  | 649   | 122                      | 1176   | 864                                   |
| 21/03/10 1:24  | 2.17                                  |                                    | 527  | 649   | 122                      | 1178   | 865                                   |
| 21/03/10 2:24  | 2.17                                  |                                    | 526  | 650   | 123                      | 1178   | 865                                   |
| 21/03/10 3:24  | 2.17                                  |                                    | 527  | 651   | 124                      | 1180   | 868                                   |
| 21/03/10 4:24  | 2.17                                  |                                    | 528  | 650   | 122                      | 1182   | 868                                   |
| 21/03/10 5:24  | 2.07                                  |                                    | 525  | 651   | 125                      | 1209   | 849                                   |
| 21/03/10 6:25  | 2.07                                  |                                    | 524  | 650   | 126                      | 1216   | 852                                   |
| 21/03/10 7:25  | 2.07                                  |                                    | 523  | 650   | 126                      | 1209   | 850                                   |
| 21/03/10 8:25  | 2.07                                  |                                    | 524  | 648   | 124                      | 1209   | 852                                   |
| 21/03/10 9:25  | 2.10                                  |                                    | 524  | 649   | 125                      | 1204   | 848                                   |
| 21/03/10 10:25 | 2.10                                  |                                    | 523  | 650   | 127                      | 1223   | 857                                   |
| 21/03/10 11:25 | 1.89                                  |                                    | 520  | 646   | 126                      | 1230   | 858                                   |
| 21/03/10 12:26 | 1.83                                  |                                    | 519  | 650   | 131                      | 1231   | 857                                   |
| 21/03/10 13:26 | 2.00                                  |                                    | 523  | 650   | 128                      | 1230   | 857                                   |
| 21/03/10 14:26 | 2.10                                  |                                    | 522  | 650   | 128                      | 1209   | 871                                   |
| 21/03/10 15:26 | 1.87                                  |                                    | 526  | 649   | 123                      | 1207   | 871                                   |
| 21/03/10 16:26 | 2.07                                  |                                    | 526  | 650   | 124                      | 1208   | 871                                   |
| 21/03/10 17:26 | 2.05                                  |                                    | 526  | 651   | 124                      | 1205   | 869                                   |
| 21/03/10 18:27 | 1.99                                  |                                    | 528  | 650   | 122                      | 1203   | 868                                   |
| 21/03/10 19:27 | 2.10                                  |                                    | 527  | 649   | 122                      | 1210   | 869                                   |
| 21/03/10 20:27 | 2.10                                  |                                    | 526  | 650   | 124                      | 1205   | 869                                   |
| 21/03/10 21:27 | 2.10                                  |                                    | 526  | 650   | 124                      | 1207   | 869                                   |
| 21/03/10 22:27 | 2.12                                  |                                    | 526  | 651   | 125                      | 1209   | 871                                   |
| 21/03/10 23:27 | 2.15                                  |                                    | 526  | 649   | 123                      | 1203   | 871                                   |
| 22/03/10 0:28  | 2.12                                  |                                    | 526  | 650   | 124                      | 1214   | 867                                   |
| 22/03/10 1:28  | 2.00                                  |                                    | 526  | 650   | 124                      | 1215   | 859                                   |
| 22/03/10 2:28  | 2.00                                  |                                    | 649  | 649   | 121                      | 1208   | 860                                   |
| 22/03/10 3:28  | 2.79                                  |                                    | 524  | 650   | 126                      | 1100   | 819                                   |
| 22/03/10 13:30 | 2.80                                  |                                    | 295  | 424   | 129                      | 1123   | 778                                   |
| 22/03/10 14:30 | 2.80                                  |                                    | 309  | 420   | 111                      | 1131   | 778                                   |
| 22/03/10 15:30 | 2.80                                  |                                    | 308  | 411   | 103                      | 1131   | 778                                   |
| 22/03/10 18:31 | 2.80                                  |                                    | 308  | 439   | 131                      | 1117   | 768                                   |
| 22/03/10 19:31 | 2.80                                  |                                    | 314  | 484   | 170                      | 1110   | 776                                   |
| 22/03/10 20:31 | 2.80                                  |                                    | 359  | 488   | 129                      | 1082   | 769                                   |
| 22/03/10 21:31 | 2.80                                  |                                    | 365  | 494   | 129                      | 1097   | 774                                   |
| 22/03/10 22:31 | 2.81                                  |                                    | 360  | 495   | 135                      | 1103   | 777                                   |
| 22/03/10 23:31 | 2.81                                  |                                    | 350  | 495   | 145                      | 1103   | 779                                   |
| 26/03/10 0:44  | 1.79                                  |                                    | 354  | 486   | 131                      | 1039   | 762                                   |
| 26/03/10 1:44  | 1.70                                  |                                    | 362  | 467   | 105                      | 1049   | 768                                   |
| 26/03/10 2:44  | 1.50                                  |                                    | 359  | 472   | 113                      | 1047   | 768                                   |
| 26/03/10 3:44  | 1.60                                  |                                    | 350  | 470   | 120                      | 1047   | 769                                   |
| 26/03/10 4:44  | 1.60                                  |                                    | 362  | 469   | 107                      | 1048   | 769                                   |
| 26/03/10 5:44  | 1.71                                  | 355                                | 469  | 114   | 1049                     | 772  |                                       |
| 26/03/10 6:45  | 1.61                                  | 355                                | 470  | 115   | 1108                     | 815  |                                       |
| 26/03/10 7:45  | 1.51                                  | 355                                | 469  | 114   | 1139                     | 834  |                                       |
| 26/03/10 8:45  | 1.51                                  | 358                                | 470  | 112   | 1152                     | 842  |                                       |
| 26/03/10 10:45 | 1.51                                  | 355                                | 470  | 115   | 1252                     | 865  |                                       |
| 26/03/10 11:45 | 1.41                                  | 353                                | 471  | 117   | 1268                     | 897  |                                       |
| 26/03/10 12:46 | 1.50                                  | 354                                | 471  | 117   | 1294                     | 928  |                                       |
| 26/03/10 13:46 | 1.50                                  | 358                                | 470  | 112   | 1291                     | 926  |                                       |
| 26/03/10 14:46 | 1.50                                  | 357                                | 471  | 114   | 1248                     | 905  |                                       |
| 26/03/10 15:46 | 1.60                                  | 360                                | 470  | 111   | 1200                     | 891  |                                       |
| 26/03/10 16:46 | 1.55                                  | 356                                | 470  | 113   | 1248                     | 906  |                                       |
| 26/03/10 17:46 | 1.60                                  | 357                                | 470  | 113   | 1200                     | 881  |                                       |
| 26/03/10 18:47 | 1.54                                  | 355                                | 470  | 115   | 1285                     | 936  |                                       |
| 26/03/10 19:47 | 1.50                                  | 358                                | 470  | 112   | 1256                     | 930  |                                       |
| 26/03/10 20:47 | 1.52                                  | 359                                | 471  | 112   | 1255                     | 929  |                                       |
| 26/03/10 21:47 | 1.60                                  | 359                                | 470  | 111   | 1262                     | 930  |                                       |
| 26/03/10 22:47 | 1.62                                  | 359                                | 471  | 112   | 1269                     | 936  |                                       |
| 26/03/10 23:47 | 1.63                                  | 354                                | 469  | 115   | 1264                     | 934  |                                       |
| 27/03/10 0:48  | 1.93                                  | 353                                | 471  | 117   | 1262                     | 934  |                                       |
| 27/03/10 1:48  | 1.83                                  | 357                                | 470  | 113   | 1262                     | 934  |                                       |
| 27/03/10 2:48  | 2.15                                  | 355                                | 470  | 116   | 1275                     | 938  |                                       |
| 27/03/10 3:48  | 2.05                                  | 355                                | 470  | 116   | 1260                     | 934  |                                       |
| 27/03/10 4:48  | 2.15                                  | 361                                | 470  | 109   | 1261                     | 933  |                                       |
| 27/03/10 5:48  | 1.40                                  | 358                                | 470  | 112   | 1255                     | 930  |                                       |
| 27/03/10 6:49  | 2.33                                  | 357                                | 470  | 113   | 1270                     | 932  |                                       |
| 27/03/10 7:49  | 2.43                                  | 358                                | 470  | 112   | 1261                     | 936  |                                       |
| 27/03/10 8:49  | 2.33                                  | 357                                | 470  | 112   | 1275                     | 936  |                                       |
| 27/03/10 9:49  | 2.44                                  | 356                                | 470  | 115   | 1304                     | 948  |                                       |
| 27/03/10 10:49 | 2.44                                  | 359                                | 470  | 111   | 1311                     | 952  |                                       |
| 27/03/10 11:49 | 2.44                                  | 355                                | 470  | 115   | 1297                     | 946  |                                       |
| 27/03/10 12:50 | 2.44                                  | 355                                | 470  | 114   | 1303                     | 947  |                                       |
| 27/03/10 13:50 | 2.14                                  | 354                                | 471  | 117   | 1316                     | 949  |                                       |
| 27/03/10 14:50 | 2.04                                  | 353                                | 470  | 117   | 1319                     | 949  |                                       |
| 27/03/10 15:50 | 2.24                                  | 355                                | 469  | 114   | 1321                     | 953  |                                       |
| 27/03/10 16:50 | 2.68                                  | 351                                | 470  | 120   | 1329                     | 964  |                                       |
| 27/03/10 17:50 | 2.58                                  | 353                                | 470  | 117   | 1360                     | 981  |                                       |
| 27/03/10 18:51 | 2.58                                  | 351                                | 470  | 119   | 1332                     | 965  |                                       |
| 27/03/10 19:51 | 2.58                                  | 350                                | 470  | 120   | 1319                     | 960  |                                       |
| 27/03/10 20:51 | 2.58                                  | 355                                | 470  | 114   | 1326                     | 959  |                                       |
| 27/03/10 21:51 | 2.48                                  | 354                                | 470  | 116   | 1323                     | 958  |                                       |
| 27/03/10 22:51 | 2.58                                  | 356                                | 470  | 114   | 1351                     | 966  |                                       |
| 27/03/10 23:51 | 3.11                                  | 355                                | 470  | 115   | 1326                     | 959  |                                       |
|                |                                       | 10991                              |  |   |                          |  |                                       |
|                |                                       | 8985                               |  |   |                          |  |                                       |
|                |                                       | 12364                              |  |   |                          |  |                                       |

| Fecha             | PT-143<br>Presión Ingreso Z.<br>Convectiva<br>psig | PT-144<br>Presión Salida Z.<br>Convectiva<br>psig | PT-145<br>Presión Salida Z.<br>Radiante<br>psig | Caida de presión en la<br>Zona Radiante | AZ-105<br>Analizador en Gases en<br>Zona Bridewall | Acciones Realizadas  |
|-------------------|--|---|---|---|--|--|
| 21/03/10 0:24:04  | 235  | 151   | 36  | 199                                     | 6.22   |  |
| 21/03/10 1:24:14  | 236  | 151   | 36  | 199                                     | 6.35   |  |
| 21/03/10 2:24:24  | 234  | 153   | 34  | 200                                     | 6.45   |  |
| 21/03/10 3:24:34  | 234  | 150   | 37  | 197                                     | 6.31   |  |
| 21/03/10 4:24:44  | 233  | 154   | 37  | 197                                     | 6.22   |  |
| 21/03/10 5:24:54  | 233  | 156   | 37  | 196                                     | 5.12   | Se realizó la lectura del exceso de O2 y se procedio a cerra las entradas de aire de los quemadores.   |
| 21/03/10 6:25:04  | 233  | 157   | 37  | 196                                     | 4.78   |  |
| 21/03/10 7:25:14  | 234  | 159   | 37  | 197                                     | 5.34   |  |
| 21/03/10 8:25:24  | 233  | 171   | 37  | 196                                     | 5.17   | Temperatura de zona brigdewall dentro de los niveles adecuados.  |
| 21/03/10 9:25:34  | 233  | 179   | 36  | 196                                     | 5.45   |  |
| 21/03/10 10:25:44 | 241  | 174   | 38  | 203                                     | 4.69   |  |
| 21/03/10 11:25:54 | 241  | 179   | 38  | 203                                     | 4.69   | Variaciones en consumo de combustible por periodo de variación de condiciones de planta  |
| 21/03/10 12:26:04 | 242  | 176   | 39  | 204                                     | 4.66   |  |
| 21/03/10 13:26:14 | 241  | 169   | 38  | 202                                     | 4.73   |  |
| 21/03/10 14:26:24 | 242  | 157   | 39  | 203                                     | 5.40   |  |
| 21/03/10 15:26:34 | 240  | 154   | 38  | 202                                     | 5.36   |  |
| 21/03/10 16:26:44 | 239  | 152   | 38  | 201                                     | 5.33   |  |
| 21/03/10 17:26:54 | 239  | 151   | 38  | 201                                     | 5.58   |  |
| 21/03/10 18:27:05 | 238  | 148   | 38  | 201                                     | 5.35   |  |
| 21/03/10 19:27:15 | 241  | 149   | 38  | 203                                     | 5.27   |  |
| 21/03/10 20:27:25 | 240  | 149   | 38  | 202                                     | 5.50   |  |
| 21/03/10 21:27:35 | 240  | 148   | 38  | 202                                     | 5.35   |  |
| 21/03/10 22:27:45 | 240  | 149   | 38  | 201                                     | 5.29   |  |
| 21/03/10 23:27:55 | 240  | 149   | 38  | 202                                     | 5.63   |  |
| 22/03/10 0:28:05  | 239  | 148   | 38  | 201                                     | 5.02   |  |
| 22/03/10 1:28:15  | 236  | 151   | 38  | 198                                     | 4.77   |  |
| 22/03/10 2:28:25  | 236  | 153   | 39  | 197                                     | 4.78   |  |
| 22/03/10 3:28:35  | 209  | 149   | 33  | 176                                     | 7.48   | Se observo un incremento en el %O2 y se realiza la verificación del tiro y las aperturas de las entradas de aire   |
| 22/03/10 13:30:15 | 107  | 158   | 26  | 82                                      | 7.57   |  |
| 22/03/10 14:30:25 | 105  | 158   | 25  | 80                                      | 7.47   |  |
| 22/03/10 15:30:35 | 105  | 156   | 25  | 80                                      | 7.06   | Variación debido a regulación de carga por el proceso de bajar carga.  |
| 22/03/10 18:31:05 | 99   | 153   | 23  | 76                                      | 7.56   |  |
| 22/03/10 19:31:15 | 105  | 151   | 23  | 82                                      | 7.59   |  |
| 22/03/10 20:31:25 | 107  | 150   | 23  | 83                                      | 7.86   | Temperatura de zona brigdewall ligeramente baja y exceso de oxigeno alto, existe mucho ingreso de aire reflejado en alto consumo de combustible.             |
| 22/03/10 21:31:35 | 106  | 150   | 23  | 83                                      | 7.68   |  |
| 22/03/10 22:31:45 | 106  | 149   | 23  | 83                                      | 7.68   |  |
| 22/03/10 23:31:55 | 105  | 149   | 23  | 82                                      | 7.76   |  |
| 26/03/10 0:44:07  | 67   | 148   | 10  | 57                                      | 8.75   | Se baja temperatura de horno, por cambio de carga.   |
| 26/03/10 1:44:17  | 67   | 148   | 10  | 57                                      | 8.65   |  |
| 26/03/10 2:44:27  | 67   | 147   | 10  | 57                                      | 8.73   | Condiciones de Operación en etapa de regulación  |
| 26/03/10 3:44:37  | 67   | 147   | 10  | 57                                      | 8.61   |  |
| 26/03/10 4:44:47  | 68   | 148   | 10  | 58                                      | 8.66   |  |
| 26/03/10 5:44:57  | 59   | 145   | 9   | 50                                      | 8.80   |  |
| 26/03/10 6:45:08  | 71   | 148   | 12  | 59                                      | 7.96   |  |
| 26/03/10 7:45:18  | 74   | 150   | 13  | 61                                      | 7.50   |  |
| 26/03/10 8:45:28  | 74   | 158   | 13  | 61                                      | 7.31   |  |
| 26/03/10 10:45:48 | 116  | 156   | 15  | 101                                     | 4.47   | Se mejoran las condiciones de operación, con menor exceso de oxigeno, temperatura de zona brigdewall adecuada.   |
| 26/03/10 11:45:58 | 135  | 154   | 24  | 112                                     | 4.53   |  |
| 26/03/10 12:46:08 | 152  | 154   | 27  | 125                                     | 4.20   |  |
| 26/03/10 13:46:18 | 157  | 148   | 26  | 131                                     | 4.34   |  |
| 26/03/10 14:46:28 | 174  | 147   | 26  | 147                                     | 5.55   |  |
| 26/03/10 15:46:38 | 173  | 148   | 26  | 147                                     | 6.60   |  |
| 26/03/10 16:46:48 | 169  | 148   | 26  | 143                                     | 5.33   |  |
| 26/03/10 17:46:58 | 198  | 147   | 29  | 170                                     | 6.19   |  |
| 26/03/10 18:47:08 | 217  | 146   | 37  | 180                                     | 5.05   |  |
| 26/03/10 19:47:18 | 210  | 146   | 35  | 174                                     | 5.38   |  |
| 26/03/10 20:47:28 | 208  | 145   | 35  | 173                                     | 5.35   |  |
| 26/03/10 21:47:38 | 208  | 145   | 34  | 174                                     | 5.16   |  |
| 26/03/10 22:47:48 | 214  | 145   | 37  | 178                                     | 5.22   |  |
| 26/03/10 23:47:58 | 215  | 144   | 36  | 179                                     | 5.17   |  |
| 27/03/10 0:48:08  | 214  | 144   | 36  | 178                                     | 5.31   | se incrementa carga, sube el consumo de combustible por requerimiento de proceso pero se mantienen los niveles de exceso de oxigeno y temperatura adecuados. |
| 27/03/10 1:48:18  | 215  | 144   | 36  | 179                                     | 4.94   |  |
| 27/03/10 2:48:28  | 217  | 144   | 37  | 180                                     | 4.69   |  |
| 27/03/10 3:48:38  | 215  | 144   | 37  | 178                                     | 4.83   |  |
| 27/03/10 4:48:48  | 215  | 145   | 37  | 178                                     | 4.91   |  |
| 27/03/10 5:48:58  | 216  | 147   | 37  | 179                                     | 5.04   |  |
| 27/03/10 6:49:08  | 216  | 148   | 37  | 179                                     | 4.78   |  |
| 27/03/10 7:49:18  | 215  | 148   | 37  | 179                                     | 5.08   |  |
| 27/03/10 8:49:28  | 217  | 157   | 36  | 181                                     | 4.83   |  |
| 27/03/10 9:49:38  | 221  | 162   | 37  | 185                                     | 4.42   |  |
| 27/03/10 10:49:48 | 222  | 158   | 37  | 185                                     | 4.41   |  |
| 27/03/10 11:49:58 | 220  | 157   | 37  | 184                                     | 4.46   |  |
| 27/03/10 12:50:08 | 220  | 164   | 37  | 183                                     | 4.48   |  |
| 27/03/10 13:50:18 | 221  | 158   | 38  | 183                                     | 4.35   |  |
| 27/03/10 14:50:28 | 220  | 153   | 37  | 183                                     | 4.43   |  |
| 27/03/10 15:50:38 | 221  | 152   | 37  | 184                                     | 4.54   |  |
| 27/03/10 16:50:48 | 222  | 151   | 37  | 185                                     | 4.48   |  |
| 27/03/10 17:50:58 | 230  | 149   | 40  | 190                                     | 3.86   |  |
| 27/03/10 18:51:09 | 229  | 147   | 39  | 190                                     | 4.07   |  |
| 27/03/10 19:51:19 | 229  | 147   | 39  | 190                                     | 4.16   |  |
| 27/03/10 20:51:29 | 227  | 145   | 39  | 189                                     | 4.35   |  |
| 27/03/10 21:51:39 | 228  | 145   | 38  | 189                                     | 4.30   |  |
| 27/03/10 22:51:49 | 233  | 145   | 38  | 194                                     | 3.33   |  |
| 27/03/10 23:51:59 | 232  | 144   | 41  | 191                                     | 3.87   |  |







## ANEXO N° 3

**DATOS DE REFERENCIA DE LA TESIS “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL  
PROCESO DE CORROSIÓN EN HORNOS DE UNA REFINERÍA DE  
PETRÓLEO**

**1. Objetivo del Análisis**

- Análisis del efecto de corrosión por alta temperatura a través de la evaluación del tratamiento del combustible con un aditivo a base de óxido de magnesio.

**2. Bases del Análisis**

- El análisis de adición de aditivo se realizó en los Hornos de Proceso de Operaciones Conchán.

**3. Resultados Obtenidos**

- De la adición del aditivo, a continuación se muestra el cuadro con los resultados del contenido de V y Mg en los depósitos recogidos sobre la probeta utilizada, así como el cálculo de la relación Mg/V (masa) efectiva, luego del tratamiento del combustible con el aditivo en base de magnesio:

| <b>Componente</b> |                          |                    |
|-------------------|--------------------------|--------------------|
| Magnesio          | Mg Elemental<br>(% peso) | MgO<br>(% peso)    |
|                   | 2.80                     | 4.67               |
| Vanadio           | V Elemental<br>(% peso)  | MgO<br>(% peso)    |
|                   | 5.65                     | 10.08              |
|                   | <b>Obtenida</b>          | <b>Recomendada</b> |
| Relación Molar    | 2.1:1                    | 3:1                |
| Relación Masa     | 0.463                    | 0.659              |

- Luego de retirar la probeta de control ubicada en la Zona Convectiva del Horno F-1 expuesta a los gases de combustión durante un periodo de 28 días, se observó depósitos mucho más friables que los encontrados cuando la probeta estuvo expuesta a los gases de combustión sin realizarse la aditivación.
- La medición de la velocidad de corrosión antes y después del periodo de aditivación con la probeta instalada, se registraron los siguientes resultados:

|                                   | <b>Antes</b>               | <b>Después</b>           |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Tiempo de exposición (días)       | 24                         | 28                       |
| Velocidad de corrosión (mpy)      | 135.6                      | 54.2                     |
| Variación de espesor (mm)         | Min.: 0.025<br>Máx.: 0.146 | Min.: 0.02<br>Máx.: 0.04 |
| Temperatura de gases (°F)         | 990 - 1080                 | 990 – 1080               |
| Temperatura de piel de Tubo (°F)  | 700 - 971                  | 700 – 971                |
| Temperatura de probeta (°F)       | 890                        | 850                      |
| Presión de aire comprimido (psig) | 15 – 20                    | 20                       |

#### 4. Conclusiones

- Se obtuvo una disminución del rate de corrosión como resultado del tratamiento verificando la función del aditivo de minimizar los efectos corrosivos de las cenizas fundidas.
- Se verificó la acción del aditivo sobre la textura de los depósitos al volverlos más friables.

## ANEXO N° 4

## EVALUACION ECONOMICA DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION

## Ahorro en Uso de Aditivos promotores de Combustión y post Combustión

## Aditivo promotor de Combustión

|   |                        |                  |
|---|------------------------|------------------|
| <b>Ahorro total</b>   | <b>57.78 MUS\$/año</b> |                  |
| <b>Costo Total</b>  | <b>16.50 MUS\$/año</b> |                  |
| <b>Adición de aditivo promotores de combustión</b>  |                        |                  |
| <b>Cálculo del Costo Anual del Aditivo</b>  |                        |                  |
| Consumo de Combustible  | 4528 Bbl/mes           |                  |
| Horno F-1   | 2.5 Gal/min            |                  |
| Horno F-2   | 3.0 Gal/min            |                  |
| Consumo de Aditivo*   | 0.94 Bbl/mes           |                  |
| * 160 ppm de producto garantiza 100 ppm de fierro en la punta del quemador  |                        |                  |
| Costo de aditivo  | 16,498.9 US\$ al año   |                  |
| Costo referencial de aditivo  | 35 US\$/Gal            |                  |
| <b>Ahorro por adición de combustible</b>  | <b>74.28</b>           | <b>MUS\$/año</b> |
| Ahorro por mayor tiempo de vida operativa de los Equipos (menor ensuciamiento)  |                        |                  |
| Costo de Limpieza química de Hornos   | 20.0                   | MUS              |
| Frecuencia de Limpieza  | 8                      | meses            |
| Costo mensual   | 2.5                    | MUS              |
| Ahorro  |                        |                  |
| Con el presente aditivo, se espera una mejora en la combustión y menor producción de hollin, inquemados que se depositan especialmente en los tubos de la Zona Convectiva |                        |                  |
| Nueva Frecuencia de limpieza  | 12                     | meses            |
| Nuevo Costo de Limpieza química de Hornos   | 1.7                    | MUS              |
| <b>Ahorro</b>   | <b>10</b>              | <b>MUS\$/año</b> |
| Ahorro por menor consumo de combustible   |                        |                  |
| Consumo de combustible antes de la adición de aditivo   | 5.50 GPM               |                  |
| Eficiencia del Horno  | 65 %                   |                  |
| Precio de Petroleo Industrial N° 06   | 70.28 \$/Bbl           |                  |
| Se considera precio de exportación  |                        |                  |
| Ahorro  |                        |                  |
| Con el menor ensuciamiento, no se merma la transferencia de calor hacia el crudo, que significa un menor consumo de combustible   |                        |                  |
| El incremento de la eficiencia en un 1%, representa 1.5% reducción de consumo de combustible  |                        |                  |
|   | 5.42 GPM               |                  |
| <b>Ahorro por disminución de consumo de combustible</b>   | <b>64.28</b>           | <b>MUS\$/año</b> |

## Aditivo post Combustión

|   |                        |                  |
|---|------------------------|------------------|
| <b>Ahorro total</b>   | <b>68.82 MUS\$/año</b> |                  |
| <b>Costo Total</b>  | <b>15.47 MUS\$/año</b> |                  |
| <b>Adición de aditivo post combustion</b>   |                        |                  |
| <b>Cálculo del Costo Anual del Aditivo</b>  |                        |                  |
| Consumo de Combustible  | 4528 Bbl/mes           |                  |
| Horno F-1   | 2.5 Gal/min            |                  |
| Horno F-2   | 3.0 Gal/min            |                  |
| Consumo de Aditivo*   | 1.23 Bbl/mes           |                  |
| * Aditivo con 25% de Mg. dosificación en función a contaminantes totales.                             |                        |                  |
| Costo de aditivo  | 15,467.8 US\$ al año   |                  |
| Costo referencial de aditivo  | 25 US\$/Gal            |                  |
| <b>Ahorro por adición de combustible</b>  | <b>84.28</b>           | <b>MUS\$/año</b> |
| Ahorro por mayor tiempo de vida operativa de los Equipos (menores problemas de corrosión)             |                        |                  |
| Costo de Limpieza química de Hornos   | 40.0                   | MUS              |
| Frecuencia de Limpieza  | 8                      | meses            |
| Costo mensual   | 5                      | MUS              |
| Ahorro  |                        |                  |
| Con el presente aditivo, se espera la eliminación de problemas de corrosión por cenizas fundidas      |                        |                  |
| Nueva Frecuencia de limpieza  | 12                     | meses            |
| Nuevo Costo de Limpieza química de Hornos   | 3.3                    | MUS              |
| <b>Ahorro</b>   | <b>20</b>              | <b>MUS/año</b>   |
| Ahorro por menor consumo de combustible   |                        |                  |
| Consumo de combustible antes de la adición de aditivo   | 5.50                   | GPM              |
| Eficiencia del Horno  | 65                     | %                |
| Precio de Petroleo Industrial N° 06   | 70.28                  | \$/Bbl           |
| Se considera precio de exportación  |                        |                  |
| Ahorro  |                        |                  |
| Este aditivo evita la formación de costras de cenizas fundidas, que elimina la transferencia de calor |                        |                  |
| El incremento de la eficiencia en un 1%, representa 1.5% reducción de consumo de combustible          |                        |                  |
|   | 5.42                   | GPM              |
| <b>Ahorro por disminución de consumo de combustible</b>   | <b>64.28</b>           | <b>MUS/año</b>   |

### Ahorro en Mejoras en el Diseño y Control de Variables Operativas

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Ahorro total</b>  | <b>239.57 MUS\$/año</b> |
| <b>Ahorro por mejoras en el diseño</b>   | <b>265.17 MUS\$/año</b> |
| Consumo de combustible actual  | 5.50 GPM                |
| Eficiencia del Horno   | 75 %                    |
| Precio de Petroleo Industrial N° 06  | 70.28 \$/Bbl            |
| Se considera precio de exportación   |                         |
| Ahorro   |                         |
| Mejoras en el diseño y control de variables operativas<br>considera el incremento de la eficiencia del horno hasta los niveles típicos<br>para hornos cilindricos verticales |                         |
|  | 5.16 GPM                |
| <b>Ahorro por disminución de consumo de combustible</b>  | <b>265.17 MUS\$/año</b> |
| <b>Costo Total</b>   | <b>25.60 MUS\$/año</b>  |
| Se considera el costo mínimo de desarrollo de Ingeniería   | 25.6 MUS\$/año          |

**Ahorro por Cambio de Combustible****AHORRO POR CAMBIO DE COMBUSTIBLE**

Escenario Actual Con Residual de Consumo Interno

|  |                           |
|--|---------------------------|
| Consumo Real Promedio de Combustible       | 199 BPD<br>1231 MMBTU/dia |
| Consumo de Vapor Atomizante                | 1560 Lb/hr                |
| Costo de Residual de Consumo Interno (RCI) | 45.5 US\$/Bbl             |
| Costo de RCI, US\$/MMBTU                   | 7.35 US\$/MMBTU           |
| Costo de Vapor atomizante                  | 30.0 US\$/TM              |
| Costo de Mantenimiento                     | 31.6 MUS\$                |

Datos adicionales

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| API, RCI                 | 17.4  |
| Densidad RCI, lb/B1      | 333   |
| Poder Calorifico, BTU/lb | 18563 |

Calculo anual del Costo Operativo

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| Costo de Combustible RCI, MUS\$:     | 3257.5 |
| Costo Vapor, MUS\$                   | 183.4  |
| Costo de Mantenimiento, MUS\$        | 31.6   |
| Costo Operativo Total con RCI, MUS\$ | 3472.5 |

Escenario Proyectado Con Gas Natural de Camisea

|                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| Consumo Teorico                  | 1.23 MMPCD<br>1231 MMBTU/Dia |
| Consumo de Vapor Atomizante      | 0 Lb/hr                      |
| Costo de Gas Natural             | 4.29 US\$/MMBTU              |
| Costo de Mantenimiento de Hornos | 9.5 MUS\$/Año                |

Datos adicionales

|                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| Densidad de Gas Natural, Kg/m3   | 0.62   |
| Densidad de Gas Natural, lb/pie3 | 0.0387 |
| Poder Calorifico, BTU/pie3       | 1000   |

Calculo anual del Costo Operativo

|  |        |
|--|--------|
| Costo de Combustible Gas Natural, MUS\$: | 1901.2 |
| Costo Vapor, MUS\$                       | 0.0    |
| Costo de Mantenimiento, MUS\$            | 9.5    |
| Costo Operativo Total con RCI, MUS\$     | 1910.7 |

**INGRESOS / AHORROS TOTALES, MUS\$/Año (Costo de RCI-Gas Natural)****1561.8**

## Flujo de Caja

### INVERSION

2,032 MUS\$

- Desarrollo de Ingeniería y Supervisión
- Aporte reembolsable de extensión de la Red Externa de Distribución de Gas Natural de Concesionario
- Adquisición de componentes e instalación de acometidas de Gas Natural (Estación Primaria y Secundaria)
- Suministro de componentes e Instalación de Red Interna
- Suministro e Instalación de Nuevos Circuitos de Instrumentación y de Seguridad

### AHORROS E INGRESOS

Ahorros de acuerdo a lo descrito

1561.80 MUS\$

### INVERSION

TOTAL (MUS\$)

### TOTAL

2032.0

### EGRESOS

GASTOS DE MANTENIMIENTO

4% De la Inversion

DEPRECIACION ANUAL

10% De la Inversion

| AÑO                          | 0               | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             | 9             | 10            |
|------------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>INVERSION</b>             |                 |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| TOTAL                        | <b>2032.0</b>   |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| <b>INGRESOS</b>              |                 |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| TOTAL INGRESOS               |                 | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> | <b>1561.8</b> |
| <b>EGRESOS</b>               |                 |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| GASTOS DE MANTENIMIENTO      |                 | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          | 81.3          |
| DEPRECIACION                 |                 | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         |
| TOTAL EGRESOS                |                 | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  | <b>284.5</b>  |
| UTILIDAD BRUTA               |                 | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        | 1277.3        |
| UTILIDADES AL PERSONAL (10%) |                 | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         | 127.7         |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS  |                 | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> | <b>1149.6</b> |
| IMPUESTO A LA RENTA (30%)    |                 | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         | 344.9         |
| UTILIDAD NETA                |                 | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  | <b>804.7</b>  |
| DEPRECIACION                 |                 | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         | 203.2         |
| <b>FLUJO DE FONDOS</b>       | <b>(2032.0)</b> | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        | 1007.9        |

|        |     |                 |
|--------|-----|-----------------|
| VAN AL | 12% | \$3,662.9 MUS\$ |
| TIR    |     | 48.7%           |
| PAYOUT |     | 2.5 AÑOS        |