

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



Trabajo de diploma para la opción de Ingeniero Mecánico

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DEL HORNO DE LA TORRE DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA REFINERÍA "CAMILO CIENFUEGOS".

Autor: Osniel Lázaro Rodríguez Pérez

Tutores: Ing. Reinaldo Alonso Ruiz

Ing. Roxana Cortés Martínez

Cienfuegos, 2018

**DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos como parte de la culminación de los estudios de la carrera de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación del autor.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Firma Información Científico Técnica

Firma Vice Decano

Firma Tutor

Firma Sistema de Documentación de Proyecto

Pensamiento



No podríamos pensar que los resultados de nuestros estudios hoy, de nuestros análisis y de las ideas que arribemos sean perfectos, no hay obra humana perfecta. Después el tiempo, irá mejorándola progresivamente.

Fidel Castro Ruz.

Dedicatória



Dedicatoria

Dedico este Trabajo de diploma con mucho amor y cariño a:

*A mi madre: Por tener tanta dedicación, entrega y paciencia en estos seis
años de estudios.*

A mi hermano: Por ser la inspiración y la guía para ser un profesional.

A mi padre: Por su aliento y optimismo.

*A mi madrina: Por ser la persona que me aconsejó y me alentó en los
momentos más difíciles.*

A todos ellos, gracias de corazón

Agradecimientos



Agradecimientos

Es difícil nombrar a todas las personas que de una forma u otra les debo agradecer a mi formación como profesional, pero entre ellas se encuentran:

Mis tutores: Ing. Reinaldo Alonso Ruiz, Ing. Roxana Cortés Martínez, gracias por todo su apoyo, conocimiento y confianza.

Mis amistades que todos ellos pusieron al menos su granito de arena para esta gran obra, especialmente a Jorge Luis Mirabal Consuegra a su mamá Dania Ines Consuegra Salgueiro su hermana Diana Rosa Mirabal Consuegra y Leonardo Oropesa Portela.

*A mis compañeros de aula que fueron los que me alentaron en carrera
sábado por sábado.*

A todos, muchas gracias

Resumen



RESUMEN

En el proceso de refinación de petróleo están involucrados diferentes equipos dinámicos y estáticos como son los compresores, bombas, intercambiadores de calor, columnas de destilación, hornos, entre otros, que permiten la obtención de productos con una calidad requerida. Todos ellos tienen un manual de operación donde están descritos los parámetros operacionales en los cuales debe trabajar cada equipo. Los hornos de la refinería Camilo Cienfuegos actualmente no trabajan con el rendimiento requerido trayendo consigo un aumento en el consumo de combustible. En este trabajo se hace una evaluación de los parámetros de operación que influyen en el rendimiento energético de los hornos de la sección de destilación atmosférica con el objetivo de identificar cuáles son los que afectan al correcto funcionamiento de los hornos de esta sección. Primeramente, se hace un estudio de las características de estos equipos, donde se identifican cuáles son los principales parámetros que intervienen en el rendimiento energético destacándose la temperatura y velocidad de los humos, apertura de los dâmpers tanto de los hornos como de la caldera recuperadora, el exceso de aire así como el porcentaje de oxígeno de los humos. Luego se determina el rendimiento energético de los hornos de la sección 100 (destilación atmosférica) obteniéndose una eficiencia global de 68,6 % y por tanto se decide realizar un diagnóstico del equipamiento encontrándose las principales dificultades que estos presentan. Por último, se proponen un plan de mejoras para corregir estos errores y así disminuir el consumo de combustible.

Palabras claves: hornos, rendimiento energético, parámetros operacionales.

Abstract



ABSTRACT

Different dynamic and static equipment are involved in the oil refining process, such as compressors, pumps, heat exchangers, distillation columns, furnaces, among others, which allow obtaining products with a required quality. All of them have an operation manual where the operational parameters in which each team must work are described. The furnaces of the Camilo Cienfuegos refinery currently do not work with the required performance, bringing with it an increase in fuel consumption. In this paper, an evaluation of the operating parameters that influence the energy efficiency of the ovens of the atmospheric distillation section is made in order to identify which ones affect the proper functioning of the ovens in this section. First, a study of the characteristics of these equipment was made, identifying the main parameters that intervene in the energy efficiency, highlighting the temperature and speed of the fumes, opening the dampers of both the furnaces and the recovery boiler, the excess of air as well as the percentage of oxygen in the fumes. Then, the energy efficiency of the ovens of section 100 (atmospheric distillation) was determined, obtaining an overall efficiency of 68,6 %, and therefore it was decided to make a diagnosis of the equipment, finding their main difficulties. Finally, an improvement plan is proposed to correct these errors and thus reduce fuel consumption.

Keywords: furnace, energy efficiency, operational parameters.

Índice



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: ESTUDIOS DOCUMENTALES	6
1.1 DESCRIPCIÓN Y TIPOS DE HORNOS DE PROCESOS	6
1.1.1 Hornos verticales—cilíndricos	7
1.1.2 Horno tipo cabina	9
1.2 COMPONENTES DE LOS HORNOS	12
1.2.1 Secciones que conforman los hornos	12
1.2.2 Partes de un horno	14
1.3 QUEMADORES, FUNCIÓN, IMPORTANCIA Y SUS CARACTERÍSTICAS	16
1.3.1 Las funciones de un quemador	17
1.3.2 Componentes de un quemador	17
1.3.3 Atomización del fuel en un quemador	20
1.4 CARACTERÍSTICAS E IMPORTANCIA DE LAS LLAMAS DE LOS QUEMADORES	22
1.4.1 Temperatura de la llama	22
1.4.2 Formación y características de las llamas en petróleos residuales	23
1.5 CHIMENEAS	26
1.5.1 Requerimientos de control de contaminación	27
1.5.3 Temperatura de gases de chimeneas	30
1.5.4 Monóxido de carbono (CO) en los gases de combustión	30
1.5.5 Dámper de chimenea y perfil de tiro de combustión	31
1.5.6 Plancha de estrangulación removible	33
1.6 PROCESO DE LA COMBUSTIÓN	33
1.6.1 Modos de combustión en un horno	35
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE TRABAJO	38
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA	38
2.2 SECCIÓN DE CALENTADORES A FUEGO DIRECTO (S-600)	42
2.2.1 Distribución de la sección	43
2.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DEL F-01-101 (T-102 I, II, III)	44
2.4 PARÁMETROS OPERACIONALES DE DISEÑO DEL F-01-101 (T-102 I, II, III)	44
2.5 QUEMADORES DEL F-01-101 (T-102 I, II, III)	45
2.6 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO	46
2.6.1 Rendimiento energético neto	46
2.6.2 Análisis estequiométrico de la combustión	48
2.6.3 Calor perdido por radiación y convección	49
2.6.4 Calor perdido por gases de chimenea	49
2.6.5 Exceso de Aire (EA) y Humedad Relativa	50
2.6.6 Rendimiento energético bruto y del combustible	51
2.6.7 Rendimiento global del horno	52

2.7 CÁLCULO DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE	52
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS.	54
3.1 DATOS DE OPERACIÓN DEL F-01-101 (T-102 I, II, III) Y COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE	54
3.2 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL F-01-101 (T-102 I, II, III)	55
3.3 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO GLOBAL DEL F-01-101 (T-102 I, II, III).....	58
3.4 PROBLEMAS QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL F-01-101 (T-102 I, II, III).	58
3.5 PLAN DE MEJORA PARA AUMENTAR RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL F-01-101 (T-102 I, II, III).	59
3.7 CÁLCULO DEL AHORRO DE COMBUSTIBLE	61
CONCLUSIONES GENERALES	63
RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	

Introducción



INTRODUCCIÓN

En la actualidad los problemas energéticos siguen estando en primer plano de la agenda internacional. Las oscilaciones de los precios del petróleo, los conflictos que se generan en los principales países productores del petróleo y el tan anunciado agotamiento progresivo de las reservas, siguen preocupando a la humanidad, por cuanto hasta el momento, el petróleo y sus derivados siguen constituyendo la fuente energética fundamental, tanto para los procesos industriales como de servicios. Un balance energético a nivel mundial muestra que los combustibles fósiles constituyen un 87,7 % de la demanda, contemplando dentro de ellos un 36,4 % para el petróleo, un 23,5 % para el gas natural (derivado también del petróleo) y un 27,8 % para el carbón. En la actualidad disfrutamos de los diversos derivados del petróleo crudo, gracias a un proceso que se llama refinación.

En la década de 1860 empezaron aparecer las primeras refinerías en el mundo, aunque producían queroseno mediante destilación atmosférica simple. Entre los subproductos del destilado se encontraba mucho alquitrán y mucha nafta, durante los próximos treinta años el queroseno fue el producto de mayor demanda. Los dos acontecimientos más significativos en el cambio de esta situación fueron la invención de la luz eléctrica, que redujo la demanda de queroseno, la invención del motor de combustión interna a la que siguió una demanda de gasóleo diésel y gasolina (nafta). Con la llegada de la producción a gran escala y la primera Guerra Mundial, el número de vehículos propulsados por gasolina aumentó de manera espectacular, como lo hizo la demanda de gasolina. Como todos los procesos de destilación atmosférica y al vacío sólo permitían obtener del petróleo crudo cierta cantidad de gasolina. El primer proceso de craqueo térmico se aplicó en 1913. El craqueo térmico sometía los combustibles pesados a presión y calor intenso, descomponiendo así físicamente sus grandes moléculas en otras más pequeñas, con lo que producía más gasolina y combustibles de destilación. A fines de la década de 1930 se aplicó una forma más elaborada de craqueo térmico, la ruptura de la viscosidad, que permitía obtener productos más valiosos y apreciables. Al elaborarse motores de gasolina de compresión más elevada, se produjo una demanda de gasolina de mayor octanaje, con mejores cualidades antidetonantes. La introducción del craqueo catalítico y de los procesos de polimerización en la segunda mitad de la década de 1930, satisfizo esta demanda al proporcionar gasolina de mayor rendimiento

y octanajes más elevados. Al comienzo de la década de 1940 se desarrolló la alquilación, otro proceso catalítico, para producir más gasolina destinada al campo de la aviación de alto octanaje y cargas petroquímicas para la fabricación de explosivos y caucho sintético. Le siguió la isomerización catalítica, cuyo objeto era convertir los hidrocarburos para producir mayores cantidades de materias primas para la alquilación. Después de la segunda Guerra Mundial se introdujeron diversos procesos de reforma que mejoraron la calidad y el rendimiento de la gasolina, y proporcionaron productos de mayor calidad. Algunos de ellos requerían el empleo de catalizadores de hidrógeno para cambiar las moléculas y eliminar el azufre. Durante la década de 1960 se introdujeron mejoras en los catalizadores y se elaboraron métodos de proceso, como el hidrocrackeo y la reforma, para aumentar los rendimientos de la gasolina y mejorar las cualidades antidetonantes. Tales procesos catalíticos produjeron también moléculas de doble enlace (alquenos), base de la moderna industria petroquímica. El número y tipo de los diferentes procesos utilizados en las modernas refinerías dependen principalmente de la naturaleza de los crudos empleados como materia prima y de los requisitos de los productos finales. También influyen en los procesos factores económicos: costes de los crudos, valores de los productos, disponibilidad de servicios básicos y transporte.

En la actualidad del petróleo crudo se obtienen diversos productos que son de gran utilidad para el hombre; por citar unos ejemplos son diésel, gasolina y lubricantes; hoy en día estos derivados y muchos otros que obtienen de la refinación del petróleo son necesarios en nuestra vida social. Los derivados del petróleo crudo se obtienen de un proceso que se llama "refinación". En la refinación encontramos diferentes procesos tanto físicos como químicos, ellos son destilación atmosférica, destilación al vacío, cargas de craqueo, craqueo térmico, desmercaptanización, reforma térmica, coquización, hidrogenación, extracción de disolventes, desparafinado, polimerización catalítica, craqueo catalítico, ruptura de la viscosidad, alquilación, isomerización, craqueo catalítico, desasfaltado, reforma catalítica, hidrodeshulfuración, desmercaptanización con inhibidores, isomerización catalítica, hidrocrackeo, desparafinado catalítico y hidrocrackeo de residuos; de todos estos procesos se obtienen diferentes productos, como los hidrocarburos gaseosos (gases licuados, materia prima para la industria química), destilados ligeros (naftas intermedias, naftas pesadas, gasóleo), destilados pesados (lubricantes técnicos, aceites lubricantes, cera de parafina) y

residuos (petrolato, fuel residual, asfaltos, coque, sulfonatos, ácido sulfúrico, azufre, hidrógeno) Kraus, R. S. (2006).

En los diferentes procesos de la refinación se necesitan diversos equipos dinámicos y estáticos como bombas, compresores, enfriadores por aire, sopladores, intercambiadores de calor, hornos, torres y calderas que nos permiten un buen acabado para los productos intermedios y finales. Estos equipos tienen un manual de diseño y operación para que laboren de la manera más eficiente para la función que son sometidos. En los equipos de los procesos de refinación unos de los más comunes son los hornos que tienen como objetivo el calentamiento de diferentes fluidos necesarios para la obtención de productos determinados. En una refinería de petróleo crudo los hornos representan los equipos que suministran más del 90 % de la totalidad de la energía requerida para el proceso de refinación. Bajo este punto de vista, la eficiencia de cada horno representa una variable crítica a optimizar, donde el menor incremento posee un gran impacto, reduciendo el consumo de combustibles, minimizando las emisiones de gases de combustión y, finalmente, traduciéndose en menores costos operativos (*Baukal, Ch. 2000*).

La refinería “Camilo Cienfuegos” hoy presenta un problema con sus hornos de refinación. Los hornos de calentamiento de combustible están operando al límite de sus parámetros operacionales influyendo notablemente en la eficiencia de diseño de estos, por tanto hay un aumento en el consumo del combustible en el calentamiento. Al no cumplirse con los parámetros operacionales existen varios imperfectos en el proceso de operación de los mismos como: alta velocidad y temperatura en la salida de los gases de combustión, alto porcentaje de oxígeno (O_2) en la cámara de combustión y ensuciamiento en las secciones de radiación y convección. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se plantea el siguiente problema científico:

Problema científico

¿Cómo mejorar el rendimiento energético de los hornos para disminuir el consumo de combustible?

Hipótesis

Si se corrigen los parámetros operacionales se podrá aumentar el rendimiento energético y por tanto disminuir el consumo de combustible en los hornos.

Objetivo general

Proponer el plan de mejora en los hornos de la refinería para disminuir el índice de consumo de combustible.

Objetivos específicos

1. Establecer los fundamentos teóricos que sustentan la eficiente operación de los hornos industriales de una refinería de petróleo.
2. Realizar el diagnóstico de los parámetros operacionales de los hornos.
3. Calcular el rendimiento energético de los hornos utilizando los parámetros operacionales actuales.
4. Elaborar el plan de mejora para aumentar el rendimiento energético.
5. Calcular el ahorro de combustible que representa el aumento del rendimiento del horno.

La presente investigación está estructurada por resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones y recomendaciones. La bibliografía consultada está reflejada en la investigación y permitió la fundamentación teórica de dicha investigación. Se presentan adicionalmente los anexos que facilitarán la comprensión del trabajo.

El capítulo 1 aborda los aspectos teóricos del funcionamiento de los hornos de proceso, así como sus parámetros de operación. Se caracterizan los quemadores analizando sus funciones e importancia en el logro de una correcta combustión, al igual que los requerimientos de control de las chimeneas.

El capítulo 2 se realiza una caracterización de las unidades de proceso que intervienen en la destilación atmosférica, así como una descripción de la sección de calentamiento. También se muestra la metodología que se utiliza como referencia para determinar el rendimiento energético de un horno de proceso.

En el capítulo 3 se desarrolla la metodología para determinar el rendimiento energético. Se realiza un diagnóstico donde se identifican los problemas fundamentales que afectan el correcto funcionamiento de los hornos. Posteriormente se propone un plan de mejoras para corregir los problemas anteriormente detectados y por último se determina el ahorro de combustible que se obtendrá después de corregidos los problemas detectados.

Las conclusiones dan respuesta a los objetivos específicos de la investigación y validan la hipótesis planteada. Las recomendaciones permiten enfocar la continuidad de estudios y la posibilidad de generalización de las propuestas de mejora.

Capítulo 1



Capítulo I: Estudios documentales

CAPÍTULO I: ESTUDIOS DOCUMENTALES

En este capítulo se realiza un análisis de las características de los hornos de proceso describiéndolos detalladamente. Se analizan los parámetros operacionales de los hornos con el objetivo de encontrar cuáles de ellos son los que influyen en el rendimiento energético de los mismos.

1.1 Descripción y tipos de hornos de procesos

Un calentador por combustión de proceso (horno), como se muestra en la figura 1.1, es un equipo constituido por un cerramiento metálico revestido interiormente por una pared refractaria aislante, dentro del cual se dispone de un serpentín tubular por el que circula un producto que se desea calentar y/o evaporar a través del calor liberado por un combustible sólido, líquido o gaseoso que reacciona en el quemador liberando gases de combustión calientes que entregan calor por radiación al serpentín (Operador Petrolero. 2015).



Figura 1.1: Horno de proceso. **Fuente:** (Ingeniería del calor. 2013).

Un mazo tubular ubicado por encima de la sección radiante, en el camino de salida de los gases a la chimenea, recupera calor de los humos, mediante un mecanismo de convección. Esta sección se denomina sección convectiva.

Capítulo I: Estudios documentales

La utilización de estos equipos puede tener distintos propósitos como precalentamiento de una corriente previa a su fraccionamiento o reacción, evaporar la corriente de fondo de una columna de destilación o disminuir la viscosidad de un fluido para facilitar su manipulación.

Pueden utilizarse también como reactores, en este caso proveen el calor de reacción. La cantidad de combustible alimentado al horno se regula normalmente en función de la temperatura de salida de la corriente de proceso.

Un horno es un intercambiador de calor en el que el fluido de proceso fluye dentro de tubos y se calienta por radiación procedente de una llama de combustión y por convección desde los gases calientes de esta (Operador petrolero. 2015).

En la actualidad existen diferentes tipos de hornos que están diseñados para trabajar con un régimen de operación específico, los cuales están disponibles y han sido usados por muchos años. Estos hornos consisten básicamente de cuatro componentes: caja, quemadores, serpentín y chimenea; y se dividen en dos secciones en la de radiación y la de conversión (Palacio Toledo, C. I. 2011).

1.1.1 Hornos verticales–cilíndricos

Los hornos verticales–cilíndricos, (ver figura 1.2), probablemente son los más usados para rendimientos térmicos hasta 43,9 MW (150 MM BTU/h). En la sección de radiación, los tubos están colocados o colgados verticalmente en forma de círculo alrededor de los quemadores del piso. Esto hace que la llama sea paralela a los tubos en la sección de radiación. Este tipo de horno puede diseñarse con o sin la sección de convección (Wauquier, J. P. 2007).

Capítulo I: Estudios documentales



Figura 1.2: Horno cilíndrico vertical. **Fuente:** (Palacio Toledo, C. I. 2011).

Estos hornos sin la sección de convección son muy económicos en términos de inversión, pero debido a que la temperatura de los gases de escape a la salida del horno es muy alta (800–1000 °C) (1500–1800 °F), este tipo de horno tiene una eficiencia muy baja. Este arreglo requiere de un mínimo de área de planta, y las cargas típicas están entre 0,15 y 2,9 MW (0,5 y 10 MM Btu/h).

Estos hornos con una sección de convección horizontal ubicada encima de la sección de radiación proporcionan un diseño muy eficiente y económico que requiere un mínimo de área de planta.

Los gases de combustión fluyen hacia arriba a través del banco de convección y posteriormente a la chimenea. La sección de protección consiste de dos filas de tubos ubicados en el fondo de la sección de convección. La sección de convección puede no justificarse en hornos muy pequeños, es decir, menores de 1,5 MW (5 MM BTU/h), o en hornos instalados en lugares donde el costo de combustible es extremadamente bajo. La mayoría de las instalaciones nuevas con hornos de tubos radiantes verticales son de este tipo. Las cargas típicas están entre 2,9 y 29,3 MW (10 y 100 MM Btu/h). Estos hornos con la sección de convección integrada verticalmente se usaron mucho, pero actualmente rara vez se escogen para nuevas instalaciones. Los mismos tubos son usados para los servicios de radiación y convección. La porción de convección de los tubos usualmente tiene una superficie de forma extendida para incrementar el coeficiente de transferencia de calor por

Capítulo I: Estudios documentales

convección. En este tipo de horno sólo se debe quemar gas o combustibles destilados, debido a que la sección de convección es casi imposible de limpiar (PDVSA. 1995).

1.1.2 Horno tipo cabina

Horno tipo cabina con tubos en U (Anillados) (*Arbor or Wicket*)

Este es un diseño especializado en el cual la superficie de calor radiante la proveen tubos en forma de U, que se conectan a los múltiples de entrada y salida. Este tipo de horno está especialmente adaptado para el calentamiento de flujos grandes de gas bajo condiciones de baja caída de presión. Este diseño se usa mucho en el calentador de carga al reformador catalítico, y en otros servicios de calentamiento. Los quemadores están, usualmente, en piso, produciendo llama vertical, o en la pared, con la llama horizontal entre los tubos en U. Las cargas típicas por arreglo de tubos en U (*Arbor coil*), están entre 14,7 y 29,3 MW (50 y 100 MM Btu/h).

Los hornos tipo cabina con tubos orientados verticalmente ofrecen ahorros considerables en inversión. Este arreglo permite utilizar una velocidad másica relativamente baja en el proceso, debido a la gran cantidad de pasos paralelos y con una buena distribución del fluido.

En algunos casos (*Powerformer*), la sección de radiación consiste en zonas separadas para los servicios de precalentamiento y recalentamiento. Estas zonas están separadas por una pared de ladrillos. Los gases de combustión de toda la sección de radiación pasan a través de una sección común de convección, la cual efectúa usualmente un servicio de precalentamiento solamente. En este tipo de horno las variaciones en las condiciones operacionales de los servicios individuales deben ser consideradas cuidadosamente, debido a que las zonas de recalentamiento también están provistas de calor para precalentar la sección de convección. Este tipo de hornos han sido construidos en tamaños desde 20 hasta 120 MW (desde 70 hasta 400 MM BTU/h) de calor total absorbido (Grupo Gallardo Balboa. 2016).

La sección de radiación incluye los tubos horizontales al lado de las paredes y en el techo inclinado del horno ("*Hip section*"). La sección de convección se extiende sobre todo lo largo de la sección de radiación. Los quemadores están normalmente ubicados en el piso del horno en una fila por debajo del centro de la cabina y queman verticalmente, pero no es

Capítulo I: Estudios documentales

extraño conseguir diseños con quemadores montados en las paredes extremas o intermedias, por debajo del serpentín.

Este tipo de hornos han sido contruidos hasta de 150 MW (500 MM BTU/h) de calor absorbido. Sin embargo, en tamaños más pequeños como 35 MW (120 MM BTU/h), los hornos verticales–cilíndricos son mucho más económicos. Este diseño altamente eficiente y económico, representa, actualmente la mayoría de instalaciones nuevas de hornos con tubos horizontales.

Se han realizado algunas modificaciones en este tipo de horno para algunas aplicaciones especiales:

- ❖ En hornos grandes, el uso de una pared central para enfriamiento de aire permite alrededor del doble del tamaño del horno para una longitud de tubo dada. Esta configuración es usada cuando los tubos en la zona de una celda de radiación sencilla son más largos de 24 m (80 pie), o cuando la celda de radiación es de más de 15 m (50 pie) de alto. Los quemadores están ubicados en el piso. Estos hornos se conocen como hornos horizontales de caja de tubos de dos celdas. Las cargas típicas están entre 29,3 y 87,9 MW (100 y 300 MM Btu/h).

Cuando se requiera dos zonas separadas de calentamiento en la sección de radiación, se puede tener una pared divisoria central. Dependiendo del tamaño del horno, el centro de la pared puede o no estar recubierta con tubos. Los diferentes servicios pueden ser compatibles, debido a que hasta cierto punto la quema en una sección afectará la transferencia de calor en la otra sección. La máxima capacidad para un servicio es 75 % del diseño con el otro servicio a máxima capacidad, si ambos servicios usan la sección de convección (o 50 % del diseño). Si un servicio es sacado fuera de operación, el horno debe pararse completamente o se debe circular otro fluido para evitar que se quemen los tubos del lado del servicio fuera de operación. Este arreglo permite control individual de llama por cada zona del horno, además de poder tener cantidades quemadores ubicados en el piso (llama vertical), o quemadores montados en la pared (llama horizontal), a ambos lados de la pared divisoria. Estos hornos de pared divisoria central, tienen cargas típicas entre 5,9 y 29,3 MW (20 y 100 MM Btu/h) (*American Petroleum Institute*. Ed 2003).

1. Hornos tipo cabina con tubos verticales

Capítulo I: Estudios documentales

Este diseño es propiedad de la Exxon y tiene ventajas sustanciales con respecto a los diseños de otros fabricantes. Por ser un diseño propietario, sólo se hará una descripción general, ya que no será cubierto en los manuales de diseño de procesos. En la zona de radiación, los tubos están orientados verticalmente a lo largo de las cuatro paredes. Estos tubos, al igual que en hornos verticales—cilíndricos y hornos con cabina, son expuestos al fuego por un solo lado. Además, las filas de tubos verticales que atraviesan el horno son expuestas por ambos lados al fuego emitido por los quemadores ubicados en el piso. Estos tubos tienen un calor de entrada 50 % mayor que los tubos ubicados en la pared, aunque la densidad de calor pico es la misma que en los tubos de la pared. La adición de este tipo de tubos (*two-side fired tubes*) reduce el serpentín de radiación lo cual resulta en una reducción significativa del volumen de la celda de radiación, comparado con los hornos con cabina de tubos horizontales. Cada paso de tubos tiene un número igual de tubos del centro y de pared, de tal forma que la distribución de calor entre los pasos sea uniforme. Este tipo de horno es adecuado cuando se requiere el uso de quemadores de tiro forzado de gran capacidad. Dos o tres quemadores proveen el calor requerido a cada celda que por lo general fijan las dimensiones de la cámara de combustión. Una sección horizontal de convección está localizada encima de la sección de radiación. Ocasionalmente, se pueden hacer variaciones en los arreglos de este tipo de hornos. La variación más común consiste en instalar solamente los tubos centrales expuestos al fuego por ambos lados. Estos tubos son usualmente instalados en dos filas, paralelas a la sección de convección extendiéndose por todo lo largo del horno, este último arreglo es parecido al utilizado en los hornos de pirolisis. Para una cantidad de calor requerida, el uso de estos tubos (*two-side fired tubes*) requiere menor superficie (y una longitud de serpentín menor) que, en hornos convencionales, debido a que los primeros (*two-side fired tube*) absorben más calor (50 %) que los tubos de la pared (*one-side fired wall tubes*). Sin embargo, la ventaja de un serpentín más corto requerirá la utilización de una sección de radiación más larga. El uso de este tipo de tubos (*two-side fired tubes*) tiene ventajas en los siguientes casos:

- ❖ Alto costo del material de los tubos; por ejemplo, tubos gruesos de acero inoxidable.
- ❖ Cuando se requiere un corto tiempo de residencia.
- ❖ Cuando la caída de presión permisible en el serpentín es baja.

Capítulo I: Estudios documentales

- ❖ Cuando se requiera invertir para aumentar capacidad. (Los tubos de la pared pueden ser añadidos posteriormente) (PDVSA. 1995).

3. Hornos tipo cabina con tubos horizontales

En este tipo de horno, ver figura 1.3, las secciones de radiación y convección están separadas por una pared llamada pared de ladrillo.



Figura 1.3: Horno tipo cabina. **Fuente:** (Palacio Toledo, C. I. 2011).

Los hornos más largos tienen dos secciones de radiación, con una sección de convección común localizada entre ellas. Esto hace que la sección de convección sea imposible de limpiar por métodos normales de soplado. Los quemadores están ubicados al final de la pared y queman en dirección de la pared de ladrillo. Los tubos están orientados horizontalmente y están expuestos al fuego perpendicularmente. Estos hornos fueron muy populares en el pasado, pero actualmente son obsoletos debido principalmente a su alto costo (Pemex, & Instituto Mexicano de Petróleo. 2004). En la actualidad existen diferentes tipos de hornos de procesos (ver en el anexo 1).

1.2 Componentes de los hornos

1.2.1 Secciones que conforman los hornos

Los hornos están conformados por dos secciones fundamentales:

- ❖ Sección de radiación
- ❖ Sección de conversión

Capítulo I: Estudios documentales

Sección de radiación: Es la sección del horno en el cual el calor se entrega al proceso al lado de los tubos fundamentalmente por la radiación de los gases de combustión y las llamas de los quemadores. Los tubos en esta sección se encuentran en presencia de la llama como se representa en la figura 1.4. En esta parte la transmisión de calor es por radiación en un 80 % aproximado a un 20 % por convección de la circulación de gases calientes alrededor de los tubos (Hornos y Combustión. 2015).



Figura 1.4: Sección de radiación de un horno de proceso. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008)

Sección convectiva: Es la parte del horno que se encuentra constituida por un banco de tubos, que recibe calor de los gases de combustión después que los mismos abandonan la sección radiante. El calor transferido de los gases a los tubos es principalmente por convección (con excepción de las primeras filas de tubos lisos que también reciben calor por efecto de la radiación). Los tubos son usualmente de superficie extendida y los gases calientes se direccionan a través del paquete de tubos. El calor transmitido contiene CO_2 y H_2O en los gases calientes además del calor por convección. Los tubos están equipados con aletas para mejorar las condiciones de transmisión de calor (Operador Petrolero. 2015).

Un horno de proceso esta compuesto por estas dos secciones, donde cada una cumple su función en el calentamiento del producto que fluye por dentro los tubos. En los anexos 2 y 3 se muestra el interior de un horno y como están distribuidos los tubos por cada sección.

Capítulo I: Estudios documentales

1.2.2 Partes de un horno

Aislación: El aislamiento es una parte importante del horno, ya que mejora la eficiencia reduciendo al mínimo el escape de calor de la cámara climatizada. Materiales refractarios, tales como ladrillos refractarios, refractarios moldeables y fibra de cerámica, se utilizan para el aislamiento. El piso del horno es normalmente refractarios tipo moldeables mientras que los de las paredes están clavados o pegados en su lugar. La fibra de cerámica se utiliza comúnmente para el techo y la pared del horno y se clasifica por su densidad y luego su calificación máxima temperatura (Instituto Argentino del Petróleo y el gas. 2015).

Arco: Parte superior de la sección radiante, donde empieza el escudo. Los gases calientes comienzan a acelerarse hacia la sección de convección.

Carcasa (Casing): es la envolvente metálica del horno, usualmente de acero al carbono. La carcasa se protege de los gases calientes internos por aislante térmico. La carcasa debe ser hermética de manera de evitar infiltraciones de aire parásito hacia el interior del horno.

Dámper: compuertas que permiten regular el caudal de aire que ingresa a la cámara de combustión y de los gases de combustión que egresan por la chimenea. Su función principal es regular el tiro dentro del horno.

Escudo: primeras dos o tres filas (según bibliografía/diseñadores) de tubos de la sección convectiva más próxima a la sección radiante. Los tubos son lisos y la ubicación en tresbolillo permite proteger de la radiación el resto de los tubos de sección convectiva (generalmente con superficie extendida). Los tubos del escudo están expuestos a radiación directa de gases y llama de la sección radiante del horno.

Fibra cerámica: tipo de aislante interno del horno, generalmente tipo manta, sustituto del refractario. Se utiliza como aislante térmico y reflectivo de las paredes del horno.

Refractario: material utilizado en las paredes internas y piso de los hornos que posee propiedades aislantes y reflectivas.

Mirilla: aberturas de observación ubicadas en las paredes y en algunos casos en el techo para la observación del hogar (refractarios, tubos y soportes). En algunos casos las mirillas están protegidas por vidrio termorresistente.

Mufla: parte del quemador construido de material refractario.

Capítulo I: Estudios documentales

Puertas contra explosión: puertas basculantes ubicadas en las paredes del horno con determinada área construidas con el propósito de liberar presiones en caso de aumento brusco de la presión interna en el hogar. Las mismas permanecen cerradas en operación y no debe existir impedimento para su correcta apertura en caso de un aumento brusco de la presión interna en el hogar. Se ubican en la parte superior del sector de radiación del horno, y en la definición de su orientación final deben ser consideradas las plataformas de operación y mantenimiento del horno.

Paso (pass): cada una de las secciones del serpentín en las que se divide, en paralelo, al fluido de procesos. La carga total de fluidos es la suma del caudal por cada paso.

Soplador de hollín: equipo mecánico que consiste en una lanza de vapor rotativa o retráctil. Estos equipos son dispuestos en el banco de convección (has convectivo) para barrer mecánicamente, con flujo de vapor, cenizas y hollín que puedan acumularse en los tubos (Instituto Argentino del Petróleo y el gas. 2015).

Termopar o termocupla: dispositivo para medir temperaturas dentro del horno. Se construye por la unión de dos metales específicos el cual genera una diferencia de tensión eléctrica proporcional a la temperatura que mide (Díaz Castrillón, E, Biset, S, Bosani, J. P., & Costa, L. A. 2016).

Quemador: Equipo encargado de introducir una cantidad de combustible y aire simultáneamente al horno, a una velocidad, turbulencia y concentración deseada, para establecer y mantener una mezcla, ignición y combustión apropiada. El quemador debe suministrar el combustible, el aire a las velocidades y presiones adecuadas para facilitar las funciones descritas de manera segura y cualquier nivel de requerimiento térmico del proceso (*American Petroleum Institute*. Ed 2008).

Chimenea: La chimenea es la encargada de liberar los gases de combustión a la atmosfera, su diámetro es una función de la cantidad de flujo de gas de combustión, ellas deben ser diseñadas para una velocidad de 7.6 m/s (25 pie/s). Cuando los gases de combustión pasan directamente a la chimenea, el diámetro no debe ser mayor que la anchura externa (alrededor de 300 mm (12 pulg) mayor que la anchura interna) de la sección de convección. Cuando los gases de combustión entran a la chimenea proveniente de los ductos, la

Capítulo I: Estudios documentales

chimenea puede tener un diámetro un poco mayor que el ancho externo de la sección de convección. (Garay, A, López, G, Verdi, H, & Vila, V. 2008).

1.3 Quemadores, función, importancia y sus características

Un quemador es un dispositivo mecánico diseñado para producir una llama estable de tamaño y forma predecible. El quemador posibilita la utilización controlada del calor liberado por el proceso de combustión (*American Petroleum Institute* .Ed 1995).

Requerimientos de exceso de aire

El quemador debe ser dimensionado de tal forma de asegurar que el aire requerido para una buena combustión sea disponible a su capacidad máxima de diseño (Géniz Vásquez, J. 2011).

Flexibilidad del quemador

La flexibilidad es una función de varios factores, siendo los más importantes el diseño del quemador y el tipo de combustible. Los otros factores incluyen la presión del combustible, la presión de atomización del vapor y la habilidad para controlar el flujo de aire de combustión. La flexibilidad del quemador normalmente no afecta la selección del quemador ni el diseño del horno, ya que los quemadores pueden ser apagados o se puede incrementar el exceso de aire cuando el horno está operando a cargas reducidas (*American Petroleum Institute*. Ed 2008).

Quemadores de aceite

Estos están usualmente limitados por la flexibilidad de 3 ó 4 a 1, tanto para los quemadores de tiro natural como los de tiro forzado. Este límite es ajustado por el rango sobre el cual casi todas las pistolas pueden atomizar el combustible adecuadamente para una buena combustión. Al igual que con gas, la maximización de la presión del combustible maximizará la flexibilidad.

Quemadores de tiro natural

El flujo máximo de aire a través de los quemadores está gobernado por el tiro disponible del horno a nivel del quemador y por las características de flujo del registro de aire. Los quemadores de tiro natural deben ser capaces de operar a las siguientes condiciones:

1. 20% de exceso de aire para gas combustible solamente.

Capítulo I: Estudios documentales

2. 30% de exceso de aire para combustible líquido o combinación gas/líquido.

Quemadores de tiro forzado

Para este tipo de quemadores, se tiene que la quema debe estar basada en 20 % de exceso de aire (PDVSA. 1995).

1.3.1 Las funciones de un quemador

Posiciona la llama en una zona útil para la liberación de calor, inicia y mantiene la ignición, mezcla el combustible con el aire y volatiliza los combustibles sólidos y líquidos (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

1.3.2 Componentes de un quemador

Los componentes de un quemador son (ver figura 1.5): refractario que protege la garganta de quemador, la junta de expansión, el pleno, piloto o quemador piloto es encargado de crear una chispa para encendido del quemador, entrada de combustibles gas y fuel, registros o compuertas de aire y boquillas de gas o fuel.

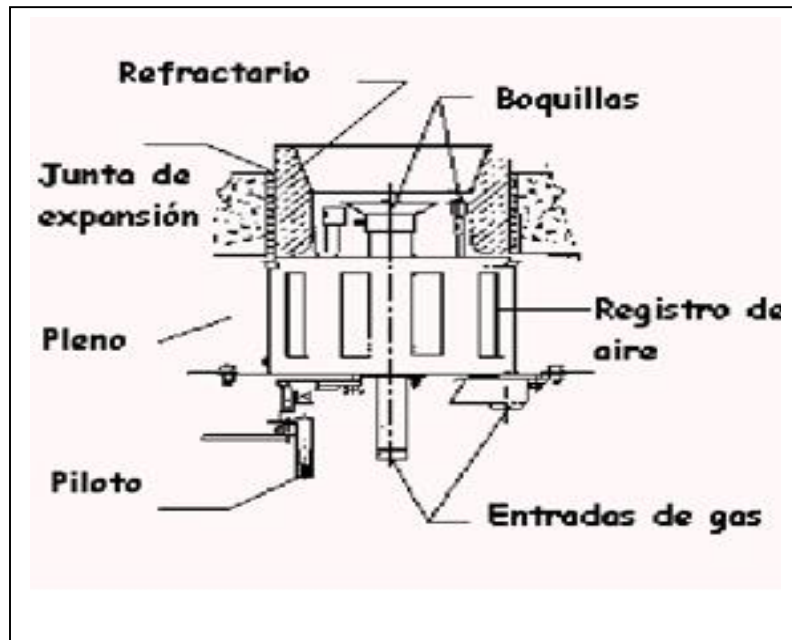


Figura 1.5: Partes de un quemador **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

Capítulo I: Estudios documentales

1.3.3 Tipos de quemadores de gas y combustible

1. Quemadores de gas

Las boquillas, lanzas o anillos para gas permiten la mezcla del gas con la corriente de aire. En la figura 1.6 se observan los diferentes tipos de mezclas (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

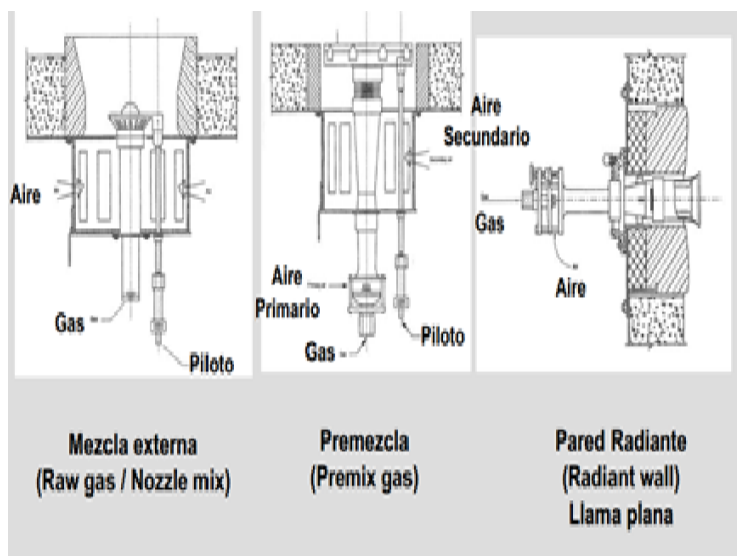


Figura 1.6: Quemadores de gas. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

2. Quemadores para combustible líquidos

Existen quemadores de líquidos forzados y de tiro natural. Sin embargo, los de tiro natural, la única configuración aceptable tiene una pistola de combustible en el centro rodeado de baldosas refractarias primarias y secundarias. La forma, longitud y calidad de las llamas del combustible líquido son una función del diseño de la pistola de atomización y del diseño de las baldosas refractarias. Normalmente, se prefiere tener quemadores de líquido del tipo de tiro forzado, por lo cual se ampliará la discusión al llegar a ese punto, en la figura 1.7 se observa un quemador para combustible líquidos con sus componentes (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

Capítulo I: Estudios documentales

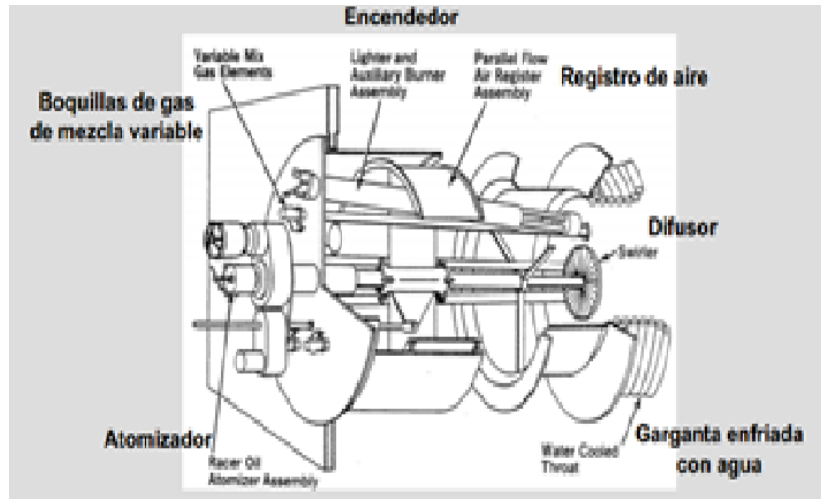


Figura 1.7 Quemador de combustible líquido. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008)

Aire primario

Es la primera corriente de aire que se mezcla con el combustible en quemador o dentro del mismo. En la figura 1.8 se observan la corriente de aire primario (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

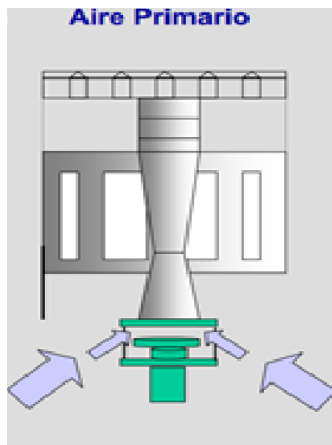


Figura 1.8: Entrada del aire primario. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008)

Aire secundario

Como se observa en la figura 1.9 el aire secundario es la segunda corriente de aire que se mezcla con el combustible en el quemador o cerca de él. (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

Capítulo I: Estudios documentales

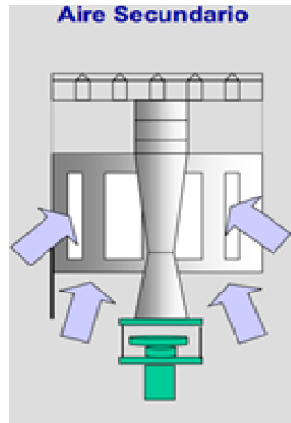


Figura 1.9: Aire secundario. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

1.3.3 Atomización del fuel en un quemador

El atomizador, como se muestra en la figura 1.10, posibilita la dispersión del combustible líquido (gotas muy finas) en la corriente de aire de combustión. Normalmente el atomizador consiste en un tubo con pequeños orificios perforados en su extremo que es llamado boquilla. La atomización puede lograrse medios mecánicos (presión) o por un fluido atomizante (aire o vapor) (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

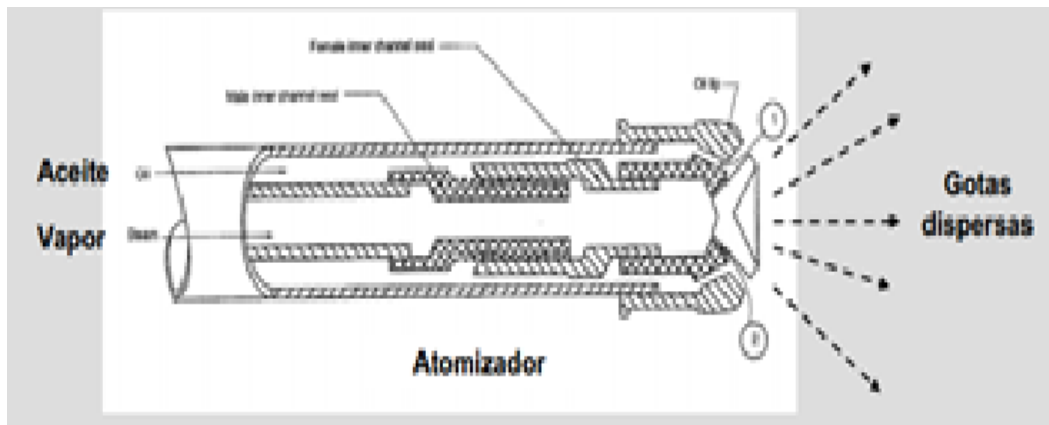


Figura 1.10: Atomizador. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008)

Otros detalles de la atomización

En la figura 1.11 se muestran los detalles de las boquillas de atomización.

Capítulo I: Estudios documentales

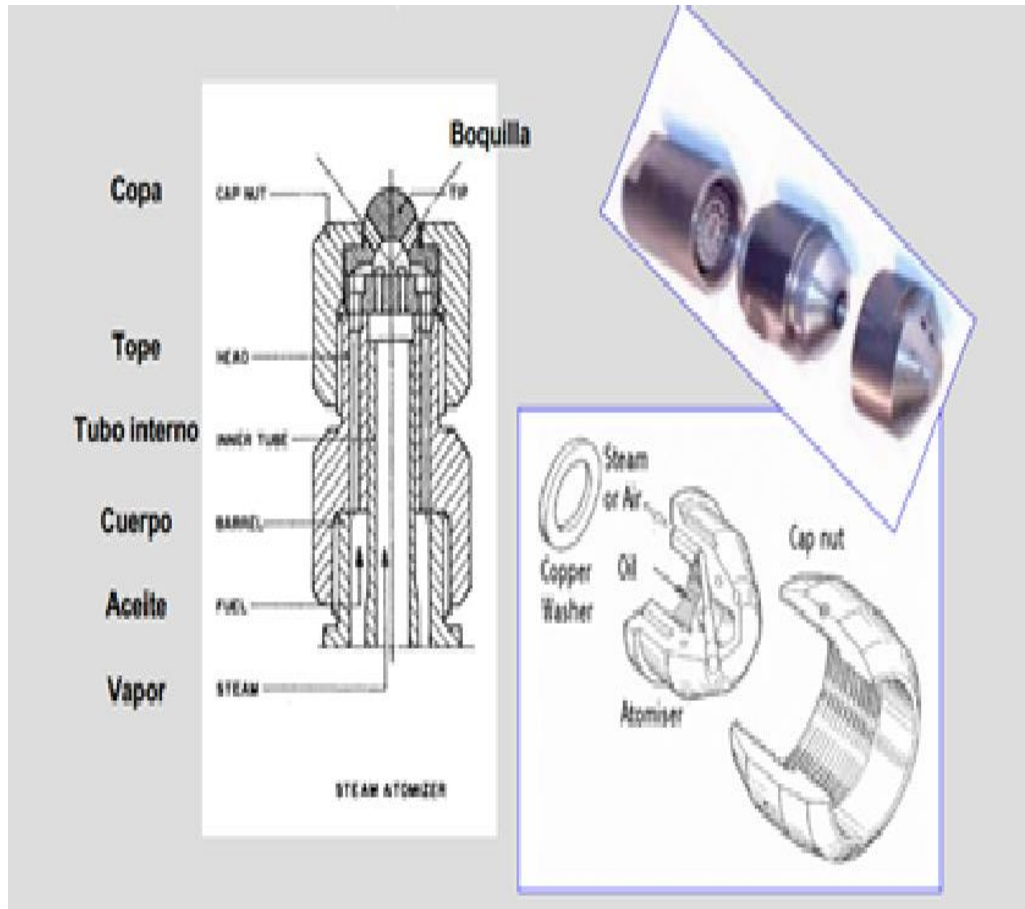


Figura 1.11: Boquillas de atomización. **Fuente:** Fuente: (ESENTERM.ca PDVSA. 2008)

Patrones de llamas

1. Determinado, para un quemador dado, por:

- ❖ Los cambios en la presión de la mezcla aire-gas.
- ❖ La cantidad de aire primario.
- ❖ El diseño del quemador (determina las velocidades relativas de las corrientes de aire y combustible).

2. Para la mayoría de los quemadores

- ❖ Un incremento en la presión de la mezcla ensanchará la llama.
- ❖ Un incremento en el porcentaje de aire primario reducirá su tamaño (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

En la figura 1.12, a, b, c y d se observan diferentes patrones de llamas dentro de la sección de radiación.

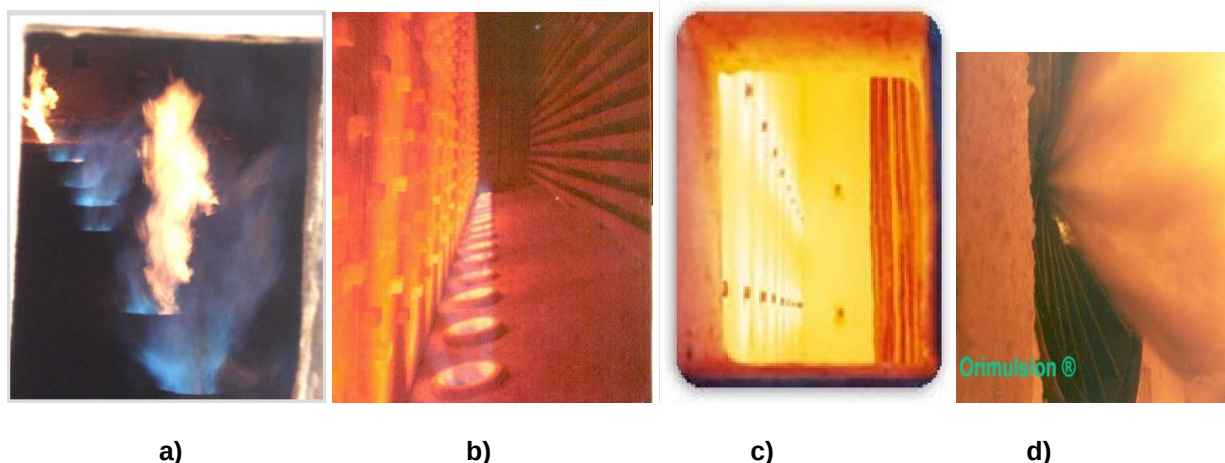


Figura 1.12: Patrones de llamas **a)** Patrón de llama producido por quemadores de mezcla externa, **b)** Patrón de llama por quemadores de mezcla externa y por bajo NO_x, **c)** Patrón de llama de quemadores de pared radiante producido gas combustible, **d)** Patrón de llama de quemadores de líquidos combustibles orimulsión. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).

1.4 Características e importancia de las llamas de los quemadores

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 (Gorra Tostega, I. I. 2009).

1.4.1 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. En la actualidad se puede tomar temperatura de la llama de forma cuantitativamente a igual que en cualquier parte del horno con equipos diseñados para ello ver en (anexos 4 y 5).

Capítulo I: Estudios documentales

1.4.2 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:

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

Desde la punta del inyector, se observa 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

Capítulo I: Estudios documentales

combustión y/o las características del proceso debiendo desarrollarse en un espacio libre, sin tocar ningún punto de las paredes o cuerpos extraños.

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 1.1 se presentan las temperaturas que corresponden a los colores comúnmente observados en los diferentes tipos de llamas, En la Figura 1.13 y 1.14, se presentan las temperaturas teóricas de llama para gas natural y petróleo Industrial en función del exceso de aire (Palacio Toledo, C. I. 2011).

Tabla 1.1: Colores de tipos de llamas

Color	T (°F)	T (°C)
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 brillante	Más de 2800	Más 1540

Fuente: (UOP Honeywell Company Fired Heaters. 2008).

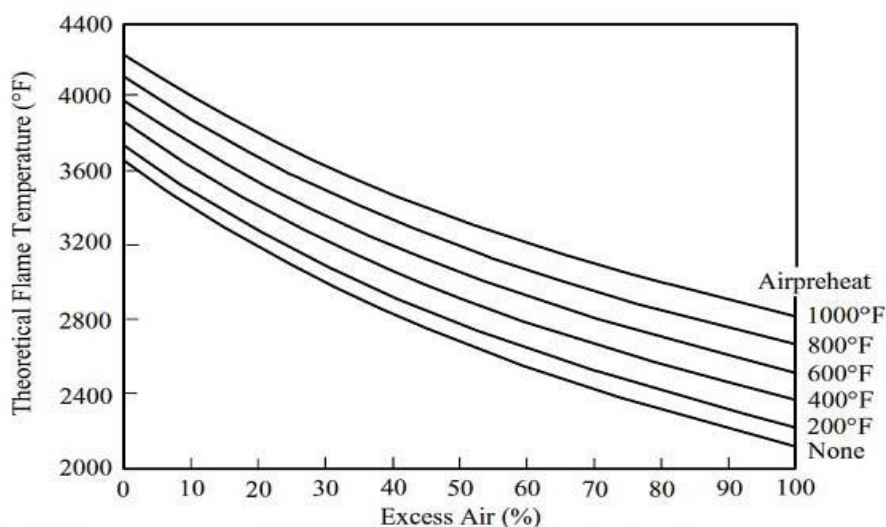


Figura 1.13: Temperatura de Llama con Gas Natural vs Exceso de Aire. **Fuente:** (UOP Honeywell Company Fired Heaters. 2008).

Capítulo I: Estudios documentales

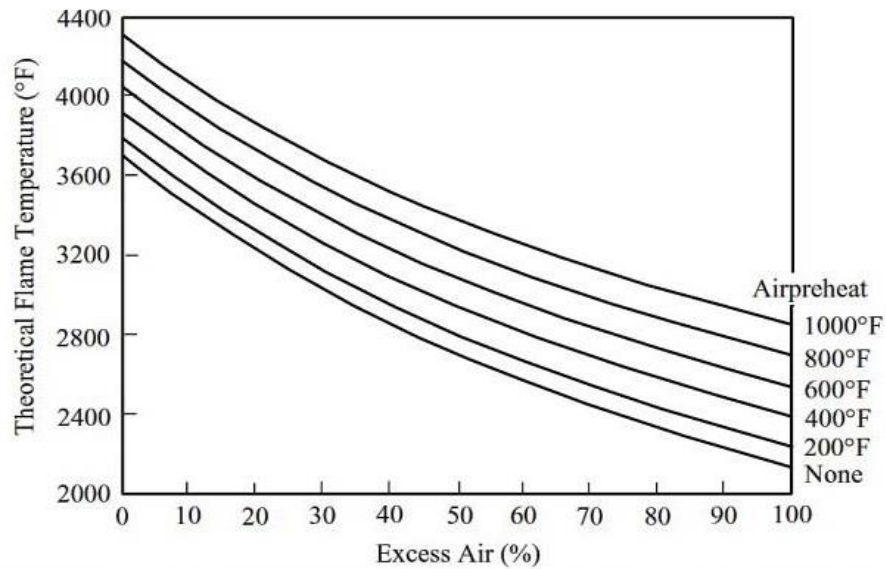
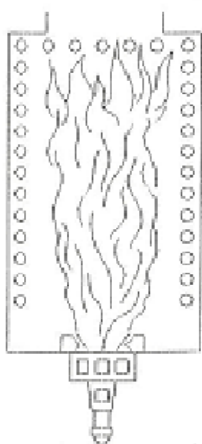
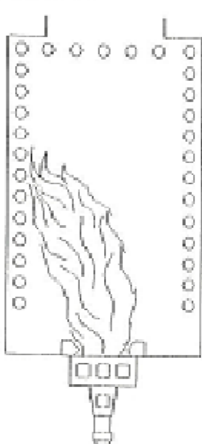
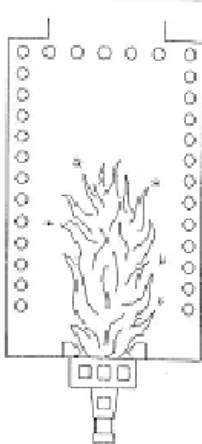


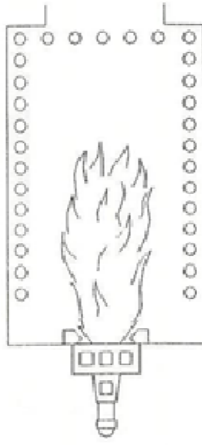
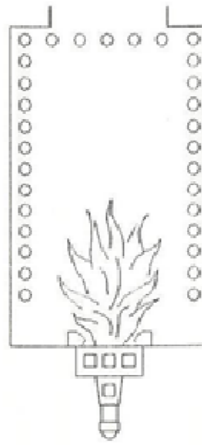
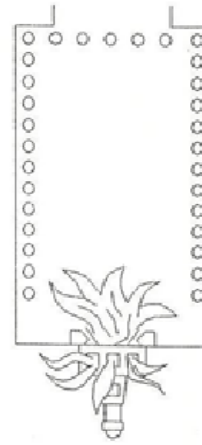
Figura 1.14: Temperatura de Llama con Petróleo Industrial vs Exceso de Aire. **Fuente:** (UOP Honeywell Company Fired Heaters. 2007).

- ❖ La forma de la llama, permite determinar las variables que pueden afectar una adecuada formación de la misma. En la figura 1.15, se presenta el efecto de las variables como: Humedad en vapor de atomización, porcentaje de exceso aire, calidad del combustible.

Capítulo I: Estudios documentales

Figura 1.15: Efectos de las variables de las llamas 2. **Fuente:** (Palacio Toledo, C. I. 2011).

Buena llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible
			
Quieta, clara, sin humo, sostenida, continua y estable Color de amarillo brillante a naranja	Llama larga que impacta con los tubos Combustión incompleta Demasiado aceite o muy poco aire o muy poco vapor de atomización	Llama inclinada Llama que impacta contra los tubos de un lado Atomización deficiente Chorro de combustible	Chispoteo Agua en el combustible Combustible sucio Poco vapor de atomización

Mala llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible	Mala llama de aceite combustible
			
Llama humeante Poco de aire de combustión Combustible frío Boquillas del quemador dañadas	Llama deslumbrante Demasiado aire secundario Demasiado vapor de atomización	Llama irregular (pobre) Muy poco aire primario Enladrillado muy espaciado	Muy poco perfil de tiro Muy poco aire primario Presión de gas muy baja

Capítulo I: Estudios documentales

1.5 Chimeneas

La función de la chimenea es la de crear el tiro necesario para hacer fluir adecuadamente los gases de combustión a través del horno y permitir la disposición de los mismos. Esta función debe ser realizada sin imponer presiones positivas sobre ninguna sección del horno no diseñado originalmente para resistir presión. La temperatura de la chimenea se establece usualmente como un compromiso económico entre de la temperatura de entrada de la alimentación, la naturaleza y el costo de combustible y el incremento del costo de las superficies de la sección de convección, los cabezales y las paredes. El diámetro de la chimenea está en función del caudal del gas que fluye. El criterio básico de diseño señala una velocidad de 25 pie/s. Todas las chimeneas de acero requieren revestimiento para mantener la temperatura del metal por debajo de 482 °C (900 °F) (Grupo Gallardo Balboa. 2016).

1.5.1 Requerimientos de control de contaminación

Cuando se requieren altas chimeneas por consideraciones del control de contaminación o por regulaciones locales, velocidades del gas en la chimenea mayores que 7,6 m/s (25 pie/s) pueden ser económicas, ya que de cualquier manera existe tiro extra para compensar la caída de presión adicional. En ocasiones, altas velocidades pueden ser requeridas por consideraciones de control de contaminación.

Cuando se usa una restricción en la salida de la chimenea (plancha de estrangulación o *chokeplate* para obtener este incremento en la velocidad, la caída de presión a través de esta plancha puede fijar la porción del tope de la chimenea bajo presión interna positiva, si la velocidad a la salida está muy por encima de 7,6 m/s (25 pie/s). Esto puede causar daños a las chimeneas de concreto o ladrillos, por lo que posiblemente se requiera un revestimiento con acero. Cuando la velocidad de salida es menor o igual a 7,6 m/s (25 pie/s), la pérdida a la salida es relativamente pequeña, por lo que se puede ignorar el efecto de una plancha de estrangulación (Garay, A, López, G, Verdi, H, & Vila, V. 2008).

1.5.2 Velocidad de los gases de chimenea

Velocidad mínima del gas de chimenea

A velocidades menores que 4,6 m/s (15 pie/s) del gas en la chimenea, puede ocurrir inversión con aire frío en la chimenea y bajar por un lado de la misma. Esta recirculación

Capítulo I: Estudios documentales

puede reducir seriamente el tiro disponible por lo que debe evitarse. En caso de que el horno se encuentre a baja carga por largo tiempo, se deben considerar las siguientes medidas:

Operar con alto exceso de aire

Durante la operación a baja carga, el porcentaje de exceso de aire puede ser aumentado tanto como sea necesario, para evitar recirculación, en caso de llegar a ser un problema. Esta solución es preferible para incrementar la velocidad del gas en la chimenea según el diseño, y se recomienda particularmente en casos donde la altura de la chimenea está basada en los requerimientos de tiro.

En tales casos, el incremento de la velocidad del gas en la chimenea requerirá aumentar la altura de la chimenea. Otra razón para aceptar un porcentaje de oxígeno mayor que el diseño durante la operación a baja carga, es cuando dificultades en el control y entradas de aire al horno, no permiten en la práctica operar a bajo exceso de aire bajo estas condiciones.

Velocidad Másica de los Gases de Combustión

Cuando la altura de las chimeneas está basada en los requerimientos del tiro, se recomiendan velocidades másicas máximas del flujo de gases de combustión. Para quemar combinaciones de combustible controla el combustible más pesado.

Combustible	Máxima velocidad másica del gas de combustión recomendada, Gc	
	kg/cm²	lb/pie²
Gas natural o combustible limpio	2,5 a 3,0	0,5 a 0,6
Combustible líquido con bajo contenido de metales y gas ácido	2,0 a 2,5	0,4 a 0,5
Combustible líquido con alto contenido de metales.	5,0 a 2,0	0,3 a 0,4

Estas recomendaciones son para la parte de la sección de convección con la velocidad másica más alta (es decir, la superficie extendida más larga).

Las velocidades másicas en secciones de la sección de convección con tubos lisos o corta superficie extendida pueden estar por debajo de los rangos recomendados.

Estos rangos de máxima velocidad másica están considerados en el diseño óptimo de la sección de convección y deben ser usados en la práctica. Bajo ciertas condiciones, como se

Capítulo I: Estudios documentales

discute abajo, se deben usar velocidades másicas más altas. En otros casos, velocidades másicas más bajas pueden ser ventajosas, tal como minimizar el número de sopladores para hacer la sección de convección más amplia, como se ha discutido previamente. Sin embargo, el diseño de las velocidades másicas del gas de combustión por debajo de $1,0 \text{ kg/m}^2$ ($0,2 \text{ lb/pie}^2$) deben ser evitadas, debido a las características pobres del flujo de los gases de combustión.

Si la velocidad másica de los gases de combustión calculada anteriormente es mayor que el rango recomendado para un combustible en particular, se debe revisar el arreglo de la sección de convección. Se deben añadir más tubos a cada fila de la sección de convección o aumentar el espacio tubo a tubo en la fila. En cualquier caso, el ancho de la sección de convección también aumentará. Preferiblemente, se debe aumentar el número de tubos por fila. Sin embargo, el número total de tubos por fila debe ser un múltiplo del número de pasos, es decir, un horno con dos pasos debe tener 4, 6 u 8 tubos por fila en la sección de convección. Bajo ciertas condiciones, el número de tubos por fila puede desviarse de este principio. Por ejemplo, un horno con cuatro pasos puede tener 6 tubos por fila. Un paso puede tener 2 tubos en una fila y un tubo en la próxima fila. El próximo paso tendrá un tubo en la primera fila, después dos tubos en la fila siguiente, etc. Sin embargo, se debe asegurar que el calor de entrada total a cada paso sea igual. Nótese que este arreglo requiere la forma de un triángulo equilátero. Cuando el número de tubos de convección por fila es igual al número de pasos, el espacio del tubo en la fila puede ser variado con el fin de obtener la velocidad másica deseada. Este espacio debe ser usado para toda la sección de convección.

Cuando las alturas de las chimeneas dependen de consideraciones de contaminación más que los requerimientos de tiro, se aceptan velocidades másicas del gas de combustión mayores que las mostradas anteriormente. Sin embargo, en estos casos la caída de presión a través de la sección de convección nunca debe ser mayor que la mitad del tiro provisto por la chimenea.

Los hornos equipados con ventiladores del tiro inducido pueden ser diseñados con velocidades másicas del gas de combustión mayores. Sin embargo, se debe considerar la necesidad de tener que desviar al ventilador durante cualquier interrupción y enviar los gases de combustión directamente a la chimenea. La velocidad óptima debe basarse en un estudio económico del costo del ventilador (costo de inversión y de operación) contra ahorro de

Capítulo I: Estudios documentales

inversión de la sección de convección. En general, con ventiladores de tiro inducido, la velocidad másica óptima es de 3,4 a 4,4 kg/cm² (0,7 a 0,9 lb/pie²).

En las secciones de convección donde el flujo de gas de combustión es forzado por una presión positiva, la velocidad másica también debe ser más alta. Las velocidades másicas del gas de combustión en el rango de 3,9 a 5,9 kg/cm² (0,8 a 1,2 lb/pie²) deben ser consideradas. En estos casos la sección de convección debe sellarse herméticamente para evitar fugas de gases de combustión (Nilo Donoso, C. F, & Núñez Lazo, L. 2013).

1.5.3 Temperatura de gases de chimeneas

Esta temperatura indica el contenido entálpico de los gases de combustión del horno. Es una variable crítica para medir la eficiencia del equipo dado que representa una gran parte del calor que se pierde. Cuanto mayor sea la misma, menor será la eficiencia y viceversa. Conviene compararla regularmente con el valor de diseño para investigar los motivos de un eventual incremento en el consumo de combustible, así como para prever algunos problemas que podrían ocurrir en el equipo, por ejemplo:

- ❖ Ensuciamiento externo de tubos en sección convectiva.
- ❖ Ensuciamiento interno de tubos.
- ❖ Cambio de alguna variable del proceso (mayor ΔT en carga).
- ❖ Operación de horno con mucho tiraje.

El monitoreo y el análisis de la temperatura de chimenea proporciona información útil para mantener e incrementar la eficiencia operativa y asegurar una buena operación del equipo (Díaz Castrillón, E, Biset, S, Bosani, J. P., & Costa, L. A. 2016).

1.5.4 Monóxido de carbono (CO) en los gases de combustión

Si hay suficiente O₂ y un mezclado eficiente, el carbono y el oxígeno reaccionan formando dióxido de carbono (CO₂), de modo que, si se detecta la presencia de CO, existe en el quemador un defecto de oxígeno o un mezclado deficiente.

La medición de CO se realiza comúnmente en la chimenea del horno, cumpliendo con las disposiciones legales, en base a exigencias de organismos de control.

De todos modos, los valores límites que no deben superarse son los definidos por los organismos de control (generalmente establecidos según el tipo de combustible) (Díaz Castrillón, E, Biset, S, Bosani, J. P., & Costa, L. A. 2016).

Capítulo I: Estudios documentales

1.5.5 Dámper de chimenea y perfil de tiro de combustión

El dámper de la chimenea actúa como una válvula de mariposa que es la que tira el gas de combustión a través de la sección de convección (Operador Petrolero. 2015) En el dámper se chequeará el porcentaje de apertura para garantizar el tiraje de los gases de combustión a la atmósfera además de consultar con el personal de operaciones sobre el funcionamiento del dámper (bueno, malo, regular, con problemas, etc.) y se asentará en observaciones, en la figura 1.16 se muestra el funcionamiento del dámper en la chimenea. Con el tiempo suelen quedar bloqueados o averiados (por problemas de corrosión, suciedad, entre otros), lo cual llevará a un mal funcionamiento general del horno (Díaz Castrillón, E, Biset, S, Bosani, J. P., & Costa, L. A. 2016).

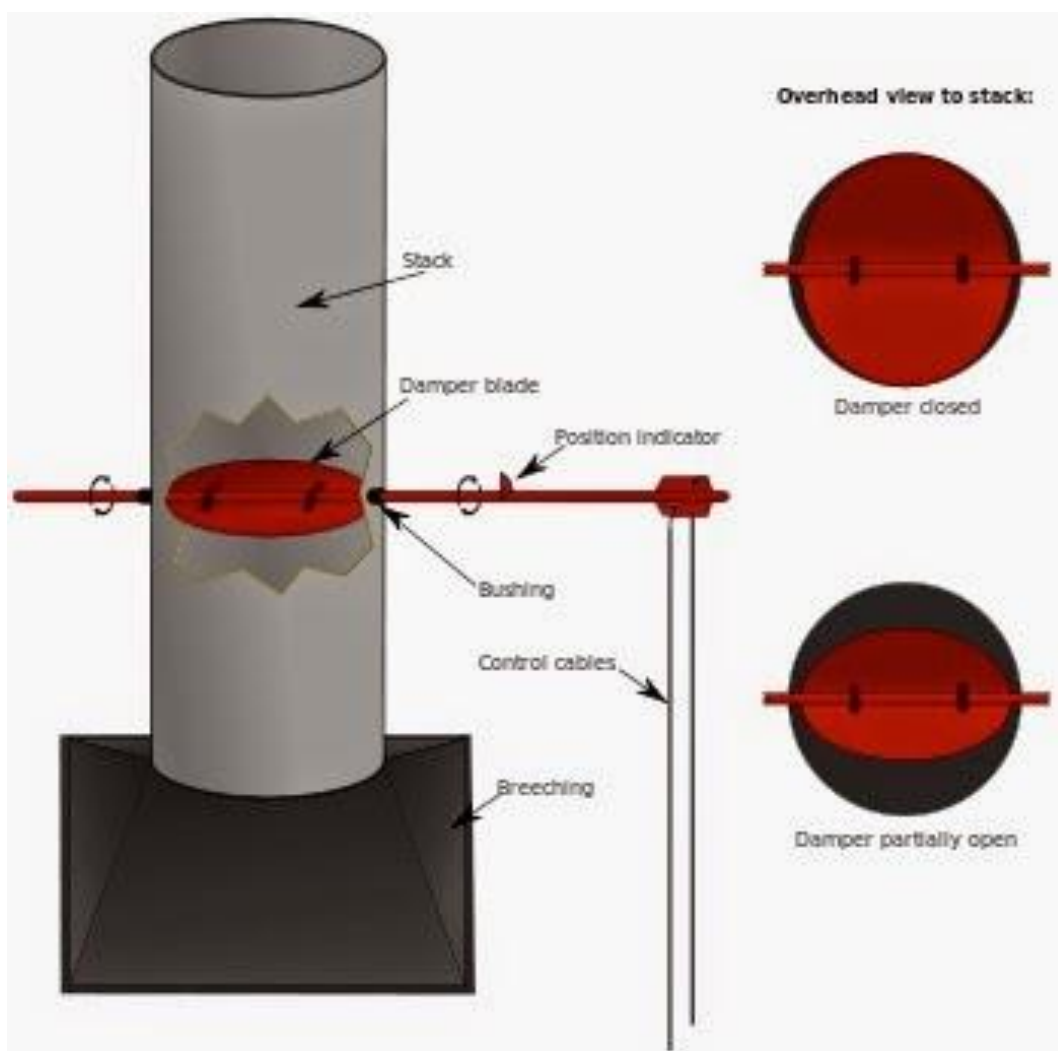


Figura 1.16: Funcionamiento del dámper en la chimenea. **Fuente:** (Operador Petrolero. 2015)

Capítulo I: Estudios documentales

El control del perfil de tiro de combustión debe ser el correcto (figura 1.17 y 1.18) pues si es muy abierto hay consecuencia de infiltraciones de aire, difícil control del quemador y excesivo consumo de combustible; si es muy cerrado hay daños estructurales, falta de aire para la combustión y la llama es muy pobre y escasa. (Golato, M. A., Franck Colombres, F, & Correa, C. A. 2008).

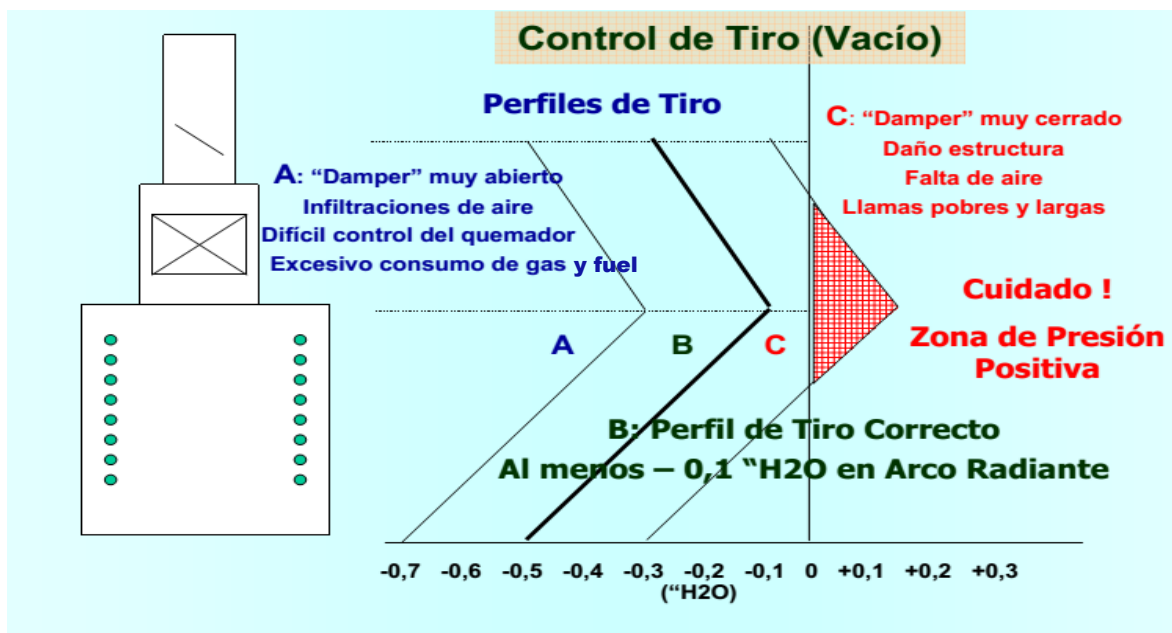


Figura 1.17: Control de tiro de vacío de una chimenea. **Fuente:** (Linares, A. (2016).

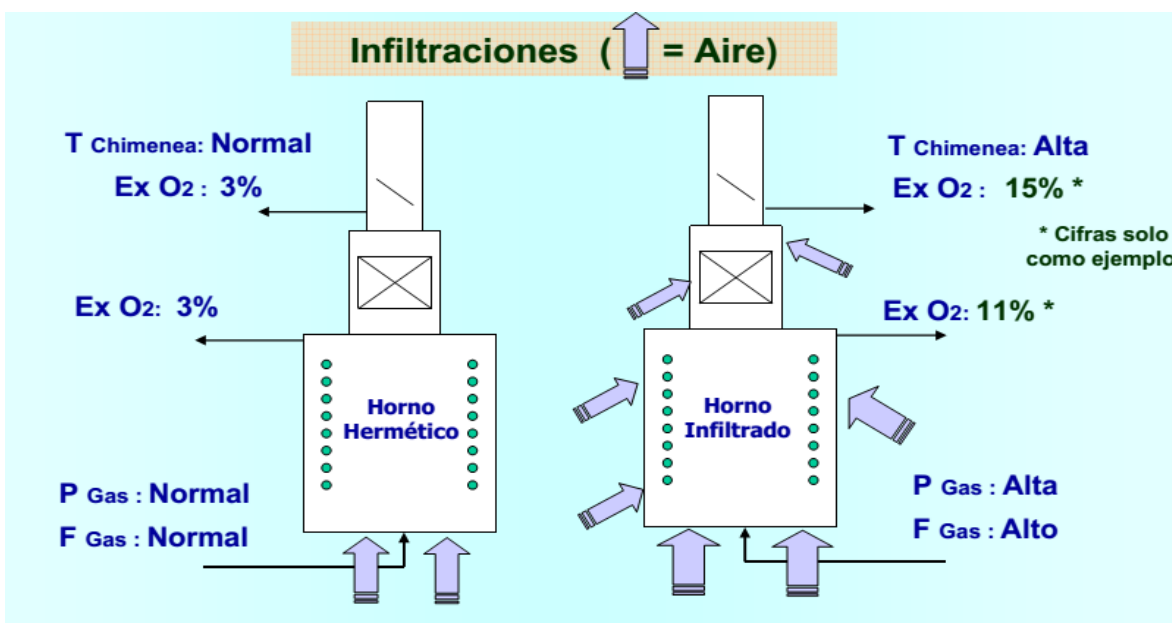


Figura 1.18: Infiltraciones de aire. **Fuente:** (Linares, A. (2016).

Capítulo I: Estudios documentales

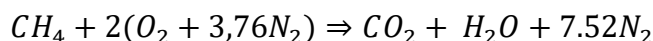
1.5.6 Plancha de estrangulación removable

Se puede considerar una tapa o plancha de estrangulación removable, como un medio de aumentar la velocidad del gas a la salida de la chimenea durante la operación inicial a baja carga. La tapa puede ser removida cuando se le aumente la carga del horno (Espinosa Valero, J. P. 2009).

1.6 Proceso de la Combustión

Un proceso de combustión está completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , todo el hidrógeno se transforma en H_2O y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO_2 . Esto es, todos los componentes combustibles de un combustible se queman totalmente durante un proceso de combustión completa. Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes no quemados, como C, H_2 , CO, o bien, OH. El oxígeno insuficiente es una razón obvia para la combustión incompleta, pero no la única. La combustión incompleta sucede incluso cuando en la cámara de combustión hay más oxígeno del necesario para la combustión completa. Esto puede atribuirse al mezclado insuficiente en la cámara de combustión durante el limitado tiempo en que el oxígeno y el combustible quedan en contacto. Otra causa de combustión incompleta es la disociación, la cual se vuelve importante a elevadas temperaturas. El oxígeno es atraído con mayor fuerza hacia el hidrógeno que hacia el carbono. Por consiguiente, el hidrógeno en el combustible normalmente se quema por completo, formando H_2O , aun cuando exista menos oxígeno del necesario para la combustión completa. No obstante, una parte del carbono termina como CO o como simples partículas C (hollín) en los productos. La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible recibe el nombre de aire estequiométrico o teórico. De manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente el oxígeno sin combinar el producto de los gases. El aire teórico también se conoce como cantidad de aire químicamente correcta o aire 100 % teórico. Un proceso de combustión con cantidad de aire menor está condenado a ser incompleto. El proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire teórico se conoce como combustión estequiométrica o teórica de ese combustible por ejemplo la combustión teórica del metano es:

Capítulo I: Estudios documentales



Los productos de la combustión teórica no contienen metano sin quemar ni C, H₂, CO, OH u O₂ libre. En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de la combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica se llama exceso de aire. La cantidad de exceso de aire suele expresarse en términos del aire estequiométrico como exceso de aire porcentual o aire teórico porcentual. Por ejemplo, 50 por ciento de exceso de aire equivale a 150 % de aire teórico, y 200 % de exceso de aire equivale a 300 % de aire teórico. Desde luego, el aire estequiométrico puede expresarse como 0 por ciento de exceso de aire o como 100 % de aire teórico. Cantidades de aire menores que la cantidad estequiométrica reciben el nombre de deficiencia de aire, y se expresan a menudo como deficiencia de aire porcentual. Por ejemplo, 90 % de aire teórico equivale a 10 % de deficiencia de aire. La cantidad de aire utilizado en procesos de combustión se expresa también en términos de la relación de equivalencia, la cual es la proporción entre la relación real combustible-aire y la relación estequiométrica combustible-aire. La predicción de la composición de los productos es relativamente fácil cuando se supone que el proceso de combustión será completo y que se conocen las cantidades exactas de combustible y aire utilizados. Todo lo que se necesita hacer en este caso es aplicar el principio de conservación de masa a cada elemento que aparece en la ecuación de la combustión, sin necesidad de tomar otras medidas. Sin embargo, cuando uno trata con procesos de combustión real, las cosas no son tan sencillas. Por alguna razón, es difícil que los procesos de combustión real siempre sean completos, incluso en presencia de exceso de aire. Por lo tanto, es imposible predecir la composición de los productos basándose únicamente en el balance de masa. Por ello, la única opción es medir directamente la cantidad de cada componente en los productos. Para analizar la composición de los gases de combustión se emplea un dispositivo conocido como analizador de gas Orsat. En este dispositivo se recoge una muestra de los gases de combustión y se enfría a temperatura y presión ambiente, en cuyo punto se mide su volumen. Después la muestra se pone en contacto con un compuesto químico que absorbe el CO₂. Los gases restantes se vuelven a llevar a la temperatura y presión ambientales, y se mide el nuevo volumen que ellos ocupan. La proporción entre la reducción de volumen y el volumen original

Capítulo I: Estudios documentales

es la fracción de volumen del CO_2 , que equivale a la fracción molar si se supone comportamiento de gas ideal. Las fracciones de volumen de los otros gases se determinan al repetir este procedimiento. En el análisis Orsat se recoge la muestra de gas sobre agua y se mantiene saturada todo el tiempo. Así, la presión de vapor del agua permanece constante durante toda la prueba. Por esta razón se ignora la presencia de vapor de agua en la cámara de prueba, y los datos se registran en una base seca. Sin embargo, la cantidad de H_2O que se forma durante la combustión se determina con facilidad balanceando la ecuación de combustión. (Cengel, Y. A., & Boles, M. A. 2012).

1.6.1 Modos de combustión en un horno

La combustión del combustible en los generadores de vapor ocurre en el horno, lugar al cual se suministra el mismo conjuntamente con el aire necesario para su combustión. Del horno salen continuamente los productos de la combustión, los cuales sirven como agente de calentamiento en el conjunto de superficies del generador de vapor.

En el horno, además del proceso de combustión, puede tener lugar, y de hecho la tiene en todas las calderas modernas, una transferencia de calor radiante a superficies de calentamiento colocadas en el mismo en forma de pantallas de tubos o paredes de agua.

En el horno debe lograrse un régimen térmico que garantice la ignición continua del combustible y su combustión completa. Debe tener el horno dimensiones y una aerodinámica tales que posibiliten que las reacciones de combustión transcurran totalmente en el mismo.

Por último, el horno debe contar con los sistemas adecuados de extracción de ceniza, y garantizar que la temperatura de salida de los gases del mismo sea inferior a la temperatura de fusión de la ceniza, para evitar incrustaciones en las superficies de calentamiento situadas a su salida. Según el tipo de combustible (sólido, líquido o gaseoso) y sus características, así será de diferente el horno y el modo de combustión.

Requerimientos que debe cumplir el horno en un generador de vapor.

El horno de un generador de vapor debe cumplir con requerimientos tales como:

- ❖ Combustión completa con mínimo exceso de aire.
- ❖ Transferencia de calor a las paredes de agua.

Capítulo I: Estudios documentales

- ❖ Régimen térmico que garantice ignición continua y combustión completa del combustible.
- ❖ Dimensiones y régimen aerodinámico que garantice que la combustión se complete en el horno.
- ❖ Temperatura de salida del horno inferior a la temperatura de fusión de la ceniza.
- ❖ Uniformidad en campos de velocidades y concentraciones en la sección transversal.
- ❖ Extracción continua de los residuos de combustión.

Los modos creados para lograr la combustión de los combustibles son varios, respondiendo esto a la necesidad de contar con formas diferentes de quemarlos, para que, ante la variedad de tipos de combustibles, se logre siempre por algún método una combustión efectiva. Por otra parte, dada la necesidad de que las características de los hornos se adapten a los diferentes modos de combustión, es que se han tenido que desarrollar diferentes tipos de hornos.

Los modos de combustión que tienen mayor importancia son tres:

- ❖ Combustión en llama.
- ❖ Combustión en suspensión.
- ❖ Combustión en capa.

El primer modo, la combustión en llama, consiste en quemar el combustible en fase gaseosa (gases), atomizado (líquidos), o pulverizado (sólidos), lanzándolo y mezclándolo con el aire de manera tal, que se forme una llama estable y continua a la salida del quemador. Como se ve puede utilizarse para cualquier tipo de combustible este modo de combustión. El segundo modo, la combustión en suspensión, consiste en lanzar el combustible pulverizado a la cámara del horno, de manera tal, que las partículas se queman estando suspendidas por corrientes de aire y gases esto es utilizados para combustibles sólidos. El tercer modo, la combustión en capa, consiste en quemar el combustible acumulado en el piso del horno, formando una capa o una pila. Esta variante se limita a su empleo en los combustibles sólidos.

Para efectuar el quemado de los combustibles, a través de los diferentes modos de combustión, se ha desarrollado un considerable número de tipos de hornos.

Capítulo I: Estudios documentales

1. Modo de combustión a la llama.

- ❖ Hornos de cámara.

2. Modo de combustión en suspensión.

- ❖ Hornos de lecho fluidizado.
- ❖ Hornos ciclónicos.
- ❖ Hornos de torbellino.

3. Modo de combustión en capa.

- ❖ Hornos de parrilla viajera.
- ❖ Hornos de parrilla fija inclinada.
- ❖ Hornos de pila.

4. Modo de combustión en suspensión y capa simultáneamente (semisuspensión).

- ❖ Hornos de parrilla horizontal basculante.
- ❖ Hornos de parrilla viajera.

La combustión a la llama y en suspensión resultan más eficientes que la combustión en capa; en estos modos el proceso se efectúa de una forma más efectiva y sin inconvenientes. Comparativamente presentan las siguientes ventajas:

- ❖ El combustible se quema atomizado o pulverizado y en suspensión en la cámara; esto permite un mejor contacto combustible - comburente, aumentando la probabilidad de choques efectivos entre moléculas, lo que hace que disminuyan las pérdidas por incombustión.
- ❖ El coeficiente de exceso de aire puede reducirse y lograrse una disminución de la pérdida por calor sensible en los gases de salida.
- ❖ En general la eficiencia del generador de vapor es superior.

La inercia térmica disminuye y se logran respuestas más rápidas ante los cambios de carga de la caldera. Esto facilita la automatización (Borroto Nordelo, A. A. & Rubio González, A. 2007).

Capítulo 2



CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este capítulo se realiza una descripción del proceso de destilación atmosférica y de la sección de calentadores de fuego de la refinería Camilo Cienfuegos. Se muestran las características fundamentales, parámetros operacionales de diseño, metodología de cálculo del rendimiento energético y el ahorro de combustible del horno F-01-101 (T-102 I, II, III).

2.1 Descripción del proceso de destilación atmosférica

La destilación atmosférica es un proceso físico-químico, que a través de temperatura, presión y reacciones químicas se obtienen diferentes derivados del petróleo crudo. Ellos tienen como destino ir a tanque como producto terminado para su exportación u otras plantas para obtener otros tipos de beneficios del petróleo (ver anexo 6).

La planta de destilación atmosférica (ver anexo 7), está destinada para procesar 57 048 barriles por días (BPD) de una mezcla de Sahara Blend y Ural, dando un total de 65 000 BPD.

Entre los procesos químicos están la desalación y deshidratación y entre los físicos la rectificación y el intercambio de calor. Todo el proceso se verifica en dos etapas:

- La desalación eléctrica.
- La destilación atmosférica.

Desalación eléctrica

El agua contenida en el petróleo con sales disueltas en ella, esencialmente con cloruros, no solamente constituye una impureza, sino que provoca una fuerte corrosión en los equipos del proceso y empeora la calidad de los combustibles que son inyectados para los procesos catalíticos.

El crudo proveniente de la estación de bombeo de crudo es descargado hacia el primer banco de intercambiadores. Este tren de intercambiadores cuenta con dos ramales en paralelo conformado, cada uno, por cuatro intercambiadores en serie. Cada ramal se calienta sucesivamente, en un banco de intercambiadores con reflujos recirculantes de la torre de destilación atmosférica (T-102) y fuel oil (FO).

Capítulo II: Metodología de trabajo

Finalmente, ambos ramales se unen para llevar el crudo precalentado a una temperatura de 100 a 120 °C y a una presión de 11 a 12 kgf/cm², al sistema de desalación eléctrica (SDE). El SDE cuenta con dos etapas de desalación cada una con un sistema de lavado con agua.

A la succión de la bomba de carga a la planta, se inyecta una solución desemulsionante, proveniente del bloque de reactivos químicos. Esto ayuda con la destrucción rápida y completa de la emulsión formada mediante la disminución de la tensión superficial de las gotas de agua a través de un campo eléctrico y lograr la desalación del crudo en el proceso.

La primera etapa, cuenta con dos electrodeshidratadores, los cuales trabajan en paralelo. La alimentación a los mismos es a través de eyectores donde se mezcla el crudo con agua proveniente del sistema de lavado.

La salida de ambos electrodeshidratadores se une, la cual es la alimentación de la segunda etapa del SDE.

La operación de los electrodeshidratadores de la segunda etapa, es similar al de la primera etapa. La alimentación a los mismos es a través de los eyectores, mezclando en estos el crudo con agua fresca proveniente del tambor abastecido del agua recirculante del primer sistema de enfriamiento.

En general, para extraer las sales el petróleo, se mezcla con intensidad con el agua dulce en los eyectores y la emulsión formada entre el agua y el petróleo se destruye y se dispersa en un campo eléctrico de los electrodeshidratadores.

Por la parte inferior de los electrodeshidratadores se drena el agua conteniendo las sales mientras el crudo desalado se extrae a un nivel superior.

Destilación atmosférica

El crudo desalado es calentado hasta la temperatura diseñada de inyección a la torre desgasolinadora (T-101), en el segundo banco de intercambiadores donde el flujo principal se divide en dos ramales en paralelo conformado cada uno, por cuatro intercambiadores en serie.

En esta etapa el crudo alcanza una temperatura de 225 °C al intercambiar en una primera etapa con la fracción 270-350 °C y en una segunda etapa con crudo reducido proveniente ambas corrientes de la T-102. En la línea de alimentación del segundo banco de

Capítulo II: Metodología de trabajo

intercambiadores, se le inyecta una solución al 2% de inhibidor de corrosión, proveniente del bloque de reactivos químicos. Finalmente, luego del segundo banco de intercambiadores, el crudo calentado desalado y deshidratado, a una presión 6,1 kgf/cm² se dirige a la T-101.

Por la línea de alimentación a la T-101, se le inyecta una solución de álcali al 1% en caso de ser requerido según la acidez contenida en el crudo de inyectar, proveniente del bloque de reactivos químicos. La alimentación a la torre se distribuye en varias entradas distribuidas en los platos 7 y 9 y por el tope de la torre sale la fracción pie 105 °C, a una temperatura de 120 °C y a una presión de 4,5 kgf/cm², hacia los enfriadores por aire, gran parte se condensan en dichos enfriadores y de allí van al tambor de reflujo del tope T-101 con una temperatura de 55 °C. En la línea de salida de los gases del tope y en la línea de reflujo de T-101, se inyecta solución al 2 % de inhibidor de corrosión (19,9 g/t de crudo), procedente del bloque de reactivos. El reflujo es retornado desde el tambor de reflujo en el tope de la T-101 en una relación tal, capaz de mantener estable y en los niveles deseado la temperatura en esta sección de la torre. El exceso de reflujo va a los enfriadores y constituye el inyectar a la torre estabilizadora (T-104). En este tambor de reflujo se hacen extracciones de agua sulfhídrica que es enfriada y va hacia la planta de tratamiento de residuales.

Desde el fondo de la T-101 sale crudo desgasolinado con una temperatura de 301 °C y a una presión de 5,5 kgf/cm², va hacia una bomba para reinyectarlo por dos corrientes, una que va al horno F-01-101(T-101) en forma de chorro caliente a la misma T-101 por debajo del plato 1 con el objetivo de mantener la temperatura de trabajo de la columna. El exceso de fondo alimenta a la columna de destilación atmosférica luego de pasar por el horno F-01-101(T-102) que cuenta con tres secciones para garantizar la temperatura adecuada del inyectar.

En la línea de salida del tope y en la línea de reflujo de la T-102, se inyecta al 2 % inhibidor de corrosión, procedente del bloque de reactivos. Por el tope de la torre sale la fracción pie 120 °C hacia enfriadores de aire a una temperatura de 114 °C y a una presión de 0,7 a 1,0 kgf/cm². Esta fracción se enfría hasta una temperatura 55 °C y va al tambor de reflujo del tope T-102. Desde el tambor de reflujo el producto va a un enfriador por aire y de allí pasa a un enfriador por agua. Posteriormente es retornada hacia el tope de la torre. En el tambor de reflujo se hacen extracciones continuas de agua sulfhídrica con una bomba, esta se descarga a través de un enfriador hacia la planta de tratamiento de residuales. De la T-102, se extraen cuatro cortes laterales la fracción 120-180 °C, se extrae por los platos 45 y 47 y va

Capítulo II: Metodología de trabajo

a la parte inferior de la primera sección de la torre despojadora (T-103), a una temperatura 134 °C. Para despojar las fracciones ligeras, es suministrado al mismo vapor de agua sobrecalentado, la fracción ligera y los vapores de agua que salen del tope T-103 entran a la T-102 en el plato 48 a una temperatura de 132 °C. La fracción de fondo es bombeada hacia un enfriador por aire y posteriormente pasa a un intercambiador por agua para finalmente llegar al nudo de mezcla. La fracción 180-230 °C, se extrae de los platos 34 y 36 y va a la parte inferior de la segunda sección de la T-103, a una temperatura 195 °C. Para despojar las fracciones ligeras, es suministrado vapor de agua sobrecalentado. La fracción ligera y los vapores de agua salen del tope de la T-103 y entran a la T-102. Por el fondo la fracción es bombeada hacia un enfriador por aire para finalmente llegar al nudo de mezcla. La fracción 230-270 °C, se extrae de los platos 22 al 24 y va a la parte inferior de la tercera sección de la torre despojadora T-103, a una temperatura 252 °C. Para despojar las fracciones ligeras, es suministrado vapor de agua sobrecalentado. La fracción ligera y los vapores de agua salen del tope de la T-103 y entran a la torre T-102. Por el fondo la fracción es bombeada hacia un intercambiador luego a enfriadores para ir al nudo de mezcla.

La fracción 270-350 °C, se extrae de los platos 12 al 14. Este corte se divide en dos ramales y va al segundo banco de intercambiadores para ceder calor al crudo desalado. De la T-102, se extraen tres reflujos recirculantes, los que son aprovechados para ceder calor en el primer banco de intercambiadores y así precalentar el crudo, antes de su desalación.

Del fondo de la T-102, se extrae el crudo reducido (fuel oíl) que cede calor en el segundo banco de intercambio al inyector de la T-101 después se dirige al primer banco de intercambiadores para ceder calor en contracorriente al crudo que se precalienta. Luego el crudo reducido sale hacia los enfriadores por aire, de estos enfriadores sale al área de tanques (MCP).

La T-103 cuenta con tres secciones donde a cada una de ellas llegan las fracciones desde la T-102.

La T-104 es alimentada con el exceso de gas y reflujo de tope de la T-101 y T-102 los cuales forman la fracción 70-120 °C inestable que se recolecta en un tambor alimentador para posteriormente ser precalentado en intercambiadores antes de ser inyectado. Por el fondo del tambor alimentador se descarga el agua sulfhídrica hacia la planta de tratamiento de

Capítulo II: Metodología de trabajo

residuales luego de ser enfriada y por el tope los gases son enviados al cabezal de gas combustible. Por el tope de la torre sale la fracción pie 70 °C inestable hacia enfriadores de aire, luego a un enfriador por agua y posteriormente pasa al tambor de reflujo del tope de la T-104 para ser retornado al tope con una relación de reflujo. El exceso pie 70 °C es bombeado a un enfriador por agua. Posteriormente, va a la sección 400. Por el fondo, de la T-104 la fracción 70-120 °C estable es recirculada a través del horno F-01-101(T-104) para mantener la temperatura en la torre. La otra salida de fracción 70-120 °C estable por el fondo de la torre va a un intercambiador donde precalienta el inyector y luego es enfriada por aire y agua y se dirige hacia el nudo de mezcla.

Productos obtenidos del nudo de mezcla de la sección 100, son:

- ❖ Fracción 70-180 °C, se forma mezclando el corte 70-120°C y corte 120-180°C. A esta fracción se le denomina Nafta de Inyector que va a la sección 200 o a MCP.
- ❖ Fracción 120-244°C, se forma mezclando el corte 120-180°C, corte 180-230°C. A esta fracción se le denomina turbo combustible, constituyendo el inyector de la planta de endulzamiento de turbo.
- ❖ Fracción 180-350 °C, se forma mezclando el corte 180-230°C, corte 230-270°C y corte 270-350°C. A esta fracción se le denomina diesel que va a MCP, constituyendo el inyector a la planta hidrofinadora de diesel (S-300-1).

Residuos:

El residuo fundamental del proceso de destilación atmosférica es el fuel oil o fracción mayor de 350°C, que como inyector a MCP y tiene una facilidad a la sección de hornos (S-600).

2.2 Sección de calentadores a fuego directo (S-600)

La sección de calentadores a fuego directo de la instalación combinada está compuesta con hornos tipo caja y cilíndricos que sirven para proveer de calor los procesos tecnológicos desarrollados en la sección de destilación atmosférica (S-100) es el F-01-101, se sección de reformación catalítica (S-200) es el F-01-201, la primera etapa de la sección hidrofinación (S-300-1) es el F-01-301, la primera sección de desbutanización (S-400-1) es el F-01-401-I y la caldera recuperadora (DK-01-601) que produce vapor saturado.

2.2.1 Distribución de la sección

- ❖ S-100 está constituida por tres hornos para calentar los productos inferiores de las columnas T-101, T-104, así como las materias primas de la T-102.
- ❖ S-200 está distribuida por cinco hornos, que el F-01-201-R-201 calienta la mezcla de gas y de materias primas de la ante los reactores de hidrofinación, así el F-01-201-R-202 al R-205 calienta los productos inferiores de la columna de desprendimiento de la torre de reformación, los de la columna de la torre de estabilización y así los gases antes de los deshumectadores.
- ❖ S-300-1 tiene dos hornos (F-01-301-R-301 y F-01-301-T-301) el que su función es calentar la materia prima antes de entrar al reactor de hidrofinación de combustóleo y el producto interior de la columna de la torre de estabilización.
- ❖ S-400-1 hay un horno el F-01-401-I que es para calentar el producto inferior de la columna de la torre debutanizadora.
- ❖ Los gases de combustión van a la caldera recuperadora a calentar el agua químicamente tratada que a través del proceso se convierte en vapor saturado.

Todos los hornos de la instalación están unidos en dos grupos de modo tal que los de las secciones 100 y 400 quedan ubicados por un lado de la DK-01-601 y los hornos de las secciones 200 y 300 por el otro lado de la misma.

Los productos de combustión que provienen de cada horno pasan por las tuberías de agua a la DK-01-601 que sirve para generar vapor, utilizando con este fin el calor de los humos de escape de los hornos.

Después de tratados en la DK-01-601, los humos de escape pasan a una chimenea de 190 m de alto, que asegura el tiro requerido del sistema de todos los hornos.

El F-01-101 (T-102 I, II, III) es uno de los hornos que presenta problemas significativos en el existen varios imperfectos en el proceso de operación, alta velocidad y temperatura en la salida de los gases de combustión, alto porcentaje de O₂ en los gases de combustión, ensuciamiento en las secciones de radiación y convección. Por lo comentado haremos una descripción en el capítulo de sus características fundamentales, parámetros de operación, el tipo de quemadores que posee y la metodología de cálculo de rendimiento energético que se utilizará.

2.3 Características fundamentales del F-01-101 (T-102 I, II, III)

El F-01-101 (T-102 I, II, III) es un horno de tipo caja que cuenta con tres secciones (ver anexo 8). El horno tiene una altura de 30 m sobre el nivel del mar. Cada sección cuenta con dos cámaras: una superior de convección y otra inferior de radiación. La sección radiante o zona de radiación cuenta con una cámara metálica de 12,5 m de alto que está revestida interiormente y levantada sobre los montantes del armazón. El serpentín de producto está constituido por 60 tubos de material 15X5M de dimensión 152x8 mm por cada sección según las normas GOST 550-75 y GOST 7512-75. Los tubos están dispuestos verticalmente a lo largo de las cuatro paredes del horno. La sección convectiva o zona de convección está constituida por una cámara rectangular revestida de material refractario aislante (losas ШБП-318) que cuenta con 41 tubos de espigados y 5 lisos, como blindaje; dispuestos horizontales de material refractario aislante losas ШБП-318 y dimensión de 152x6 mm por cada una de las 3 secciones.

En el horno sobre los serpentines de convección, está instalado el sobre-calentador que tienen como objetivo darle temperatura al vapor tecnológico, también así ayuda a eliminar de la superficie de convección y de las tuberías las cenizas; se utilizan dispositivos de soplos a vapor que están agrupados por cuatro unidades por cada sección (Lengipronefhim. 1985).

2.4 Parámetros operacionales de diseño del F-01-101 (T-102 I, II, III)

El F-01-101 (T-102 I, II, III) tiene como objetivo calentar el crudo desgasolinado que es el inyector de la T-102 donde ocurre el proceso de destilación. Él está diseñado para que en la sección de convección el producto entre a 263 °C y salga a 275 °C y en la sección de radiación entra a 275 °C y salga a 365 °C, su máxima presión de trabajo es de 27,4 kgf/cm² y su máxima presión a prueba es de 40 kgf/cm² y la presión de vacío es de - 20 kg/m². Opera con un flujo en el producto entre los 46 - 78 m³/h. El aire de combustión es de tiro natural a temperatura ambiente. Los dampers son de control manual y su apertura es de 50 % para el encendido, posteriormente se regula sobre la marcha para obtener un buen desarrollo de la llama. La temperatura en la sección de radiación se encuentra entre los 1100 a 800 °C y en la sección convectiva entre 800 y 420 °C. Los gases de combustión el porcentaje de O₂ se encuentra entre 3,5 - 5. La temperatura en la cámara no excede a 860 °C y la temperatura de los gases a la salida del horno no puede ser mayor de 520 °C. El perfil de tiro de los gases de combustible

Capítulo II: Metodología de trabajo

es de - 20 kg/m² y la velocidad entre 5 - 8 m/s. El rendimiento del horno es de 77 % con la ayuda del aprovechamiento de los humos de combustión en la DK-01-601 (Lengipronefhim. 1985).

2.5 Quemadores del F-01-101 (T-102 I, II, III)

Los datos de los quemadores del F-01-101 se muestran a continuación en la 2.1.

Tabla 2.1: Datos de quemadores del F-01-101 (T-102 I, II, III).

Quemador SAB 4.9/5.5 GO			
Cantidad	4		
Disposición	Suelo del horno		
Entrada total de calor	13 300 000 kcal/h		
Entrada de calor por caldera	4 200 000 kcal/h		
Resistencia quemador al aire combustión	15 m kgf/cm ²		
Temperatura del aire de combustión	+ 5 hasta 36,5 °C		
Características del combustible			
Parámetros	Combustibles		Atomizador
	Fuel oil	Gas hidrocarburado	Vapor sobrecalentado
Poder calórico (PCI)	9500 kcal/kg	Bajo PCI	
Viscosidad	22 cSt	-	
Presión antes de la válvula de control	6 – 15 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	12 kgf/cm ²
Presión antes del quemador (carga max.)	5,5 kgf/cm ²	0,2 kgf/cm ²	6 kgf/cm ²
Presión en el punto terminal	-	0,5 – 3 kgf/cm ²	-
Temperatura	140 °C	50 – 55 °C	200 – 220 °C
Flujo del combustible por cuatro quemadores (máximo)	1400 kg/h	1596 Nm ³ /h	0,25 kg/kg de combustible
Flujo del combustible por un solo quemador	350 kg/h	399 Nm ³ /h	
Flujo del combustible máximo por un solo quemador (diseño)	442 kg/h	504 Nm ³ /h	
Flujo del combustible por operación por cuatro quemadores	1284 kg/h	399 Nm ³ /h	
Rango de control	1 – 2,5		-

Fuente: (BTG Slovensko s. r. o., & CUPET. 2007).

2.6 Cálculo del rendimiento energético

La metodología utilizada para el cálculo del rendimiento energético se realiza según la norma API STD 560 *Fired Heaters for General Refinery Service* de la *American Petroleum Institute*.

Según la norma API STD 560, el rendimiento energético del horno corresponde al cociente entre el calor total absorbido y el calor total entregado derivado de la combustión del combustible (PCI) incluyendo el calor sensible del combustible, el aire y el medio de atomización expresado en por ciento (%).

La figura 2.1 ilustra las entradas de calor y las pérdidas de calor para la disposición típica del sistema de calentador de procesos alimentados.

2.6.1 Rendimiento energético neto

El rendimiento térmico (basada en el menor valor de calentamiento del combustible) puede determinarse mediante la siguiente ecuación (Ec):

$$e_{neto} = \frac{\text{calor total absorbido}}{\text{calor total entregado}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$e_{neto} = \frac{\text{calor total entregado} - \text{calor total perdido}}{\text{calor total entregado}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Desglosando de la ecuación 2.2

$$e_{neto} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCI + Ha + Hm + Hf)} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

e_{neto} : Rendimiento energético neto, expresado en por ciento (%).

PCI : Poder calórico inferior, expresado en (kcal/kg de FO).

Ha : Calor sensible al aire, expresado en (kcal/kg de FO).

Hf : Calor sensible de combustible, expresado en (kcal/kg de FO).

Hm : Calor sensible al medio de atomización, expresado en (kcal/kg de FO).

Qr : Pérdidas de calor por radiación asumida, expresado en (kcal/kg de FO).

Qs : Pérdidas de calor de los gases de chimenea, expresado en (kcal/kg de FO).

Capítulo II: Metodología de trabajo

$$H_a = C_{p \text{ aire}} \times (T_{\text{aire}} - T_d) \times (\text{kg de aire/kg de FO}) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$H_f = C_{p \text{ fuel}} \times (T_{\text{fuel}} - T_d) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$H_m = C_{p \text{ medio}} \times (T_m - T_d) \quad (\text{kg de aire/kg de FO}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

$C_{p \text{ aire}}$: Calor específico del aire.

$C_{p \text{ fuel}}$: Calor específico del FO.

$C_{p \text{ medio}}$: Calor específico medio de atomización.

T_{aire} : Temperatura del aire.

T_{fuel} : Temperatura del fuel.

T_m : Temperatura del medio de atomización.

T_d : Temperatura de referencia.

Como se aprecia en las unidades de cada variable, todas están en función de la masa de combustible consumido, por ende, el cálculo de eficiencia es independiente del caudal másico quemado. Para el desarrollo del cálculo se utilizará como esquema principal el que se muestra en la figura 2.1.

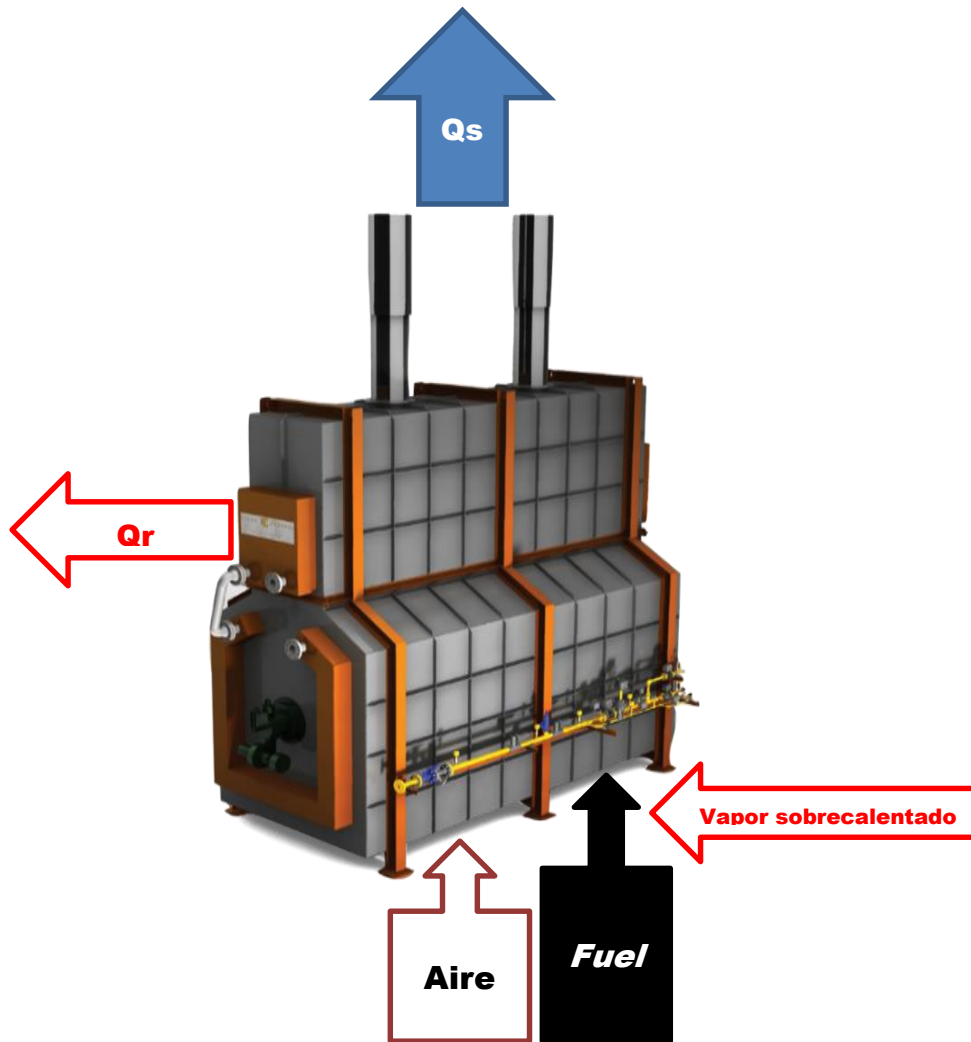


Figura 2.1: Disposición de las entradas de calor y las pérdidas de calor para la disposición típica del sistema de calentador de proceso. **Fuente:** Elaboración Propia.

2.6.2 Análisis estequiométrico de la combustión

La norma API STD 560 provee una planilla patrón donde de manera muy simplificada permite al usuario calcular la estequiometría de la reacción de combustión de cada uno de los compuestos del combustible dando como resultados el PCI, y totales de aire requerido, el dióxido de carbono, nitrógeno y agua formada. La planilla se observa en la tabla 2.2.

Al fuel oil se toman muestras del laboratorio el % C, H₂, O₂, H₂O y S esos resultados se ubican en la columna número 3 de la planilla.

Capítulo II: Metodología de trabajo

Tabla 2.2: Planilla para el cálculo estequiométrico del combustible.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fracción Volumen	Peso molecular	Peso total	Valor PCI	PCI	Aire	Aire requerido	CO ₂	CO ₂ formado	H ₂ O	H ₂ O formado	N ₂	N ₂ formado
		lb/mol	lb	BTU/lb	BTU	lb aire/ lb fuel	lb	lb _{CO2} / lb fuel	lb	lb _{H2O} / lb fuel	lb	lb _{N2} /lb fuel	lb
C		12,00		-	-	11,51		3,66		-	-	8,85	
H₂		2,02		51600	567 6	34,29		-	-	3,94		26,4	
O₂		32,00		-	-	-4,32		-	-	-	-	-	
N₂		28,00		-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	
CO		28,00		4345		2,47		1,57				1,90	
CO₂		44,00		-		-		1,00		-		-	
CH₄		16,00		21500		17,24		2,74		2,25		13,3	
Etano		30,10		20420		16,09		2,93		1,80		12,4	
Etileno		28,10		20290		14,79		3,14		1,28		11,4	
Acetileno		26,00		20740		13,29		3,38		0,69		10,2	
Propano		44,10		19930		15,68		2,99		1,63		12,1	
Propileno		42,10		19690		14,79		3,14		1,28		11,4	
Butano		58,10		19670		15,46		3,03		1,55		11,9	
Butileno		56,10		19420		14,79		3,14		1,28		11,4	
Pentano		72,10		19500		15,33		3,05		1,50		11,9	
Hexano		86,20		19390		15,24		3,06		1,46		11,7	
Benceno		78,10		17270		13,27		3,38		0,69		10,3	
Metanol		32,00		8580		6,28		1,38		1,13		4,98	
Amoniaco		17,00		8000		6,10		-		1,59		5,51	
S		32,10		-	-	4,31		2,00		-	-	3,31	
H₂S		34,10		6550		6,08		1,88		0,53		4,68	
H₂O		18,00		-	-	-	-	-	-	1,00		-	-
Tota lb													

Fuente:(American Petroleum Institute. 2001).

2.6.3 Calor perdido por radiación y convección

La pérdida de calor por radiación y convección en el horno se presenta en todos los sentidos (laterales, superior, inferior, entrada y salida) (AChEE, A. C. de E. E. 2015). Según la norma API STD 560(1) se ha considerado que las pérdidas por radiación sean igual al 1,5 % del PCI del combustible empleado.

2.6.4 Calor perdido por gases de chimenea

Una vez obtenida la composición de los gases de chimenea mediante los cálculos estequiométrico y el exceso de aire, la planilla de cálculo determina el calor total perdido por los mimos. La norma STD 560, a través de las curvas Entalpía-Temperatura dentro de las figuras provee de manera gráfica la cantidad de energía por masa de combustible quemado

Capítulo II: Metodología de trabajo

correspondiente a cada compuesto (ver anexo 9 y 10). Dichas curvas se ajustan a rectas, se obtuvieron a través de regresiones lineales las ecuaciones de la columna 2 de la Tabla 2.3.

(Biset, S & Ferreyra, M, 2013).

Tabla 2.3: Pérdidas de gases de combustión.

Componente	1	2	3
	lb form/lb de fuel	Entalpía a T(BTU/lb form)	Contenido de calor (BTU/lb fuel)
CO ₂	Tabla 2.2 (Columna 9)	0,269Tg-29,69	
H ₂ O	Resultado de la (Ec. 2.13)	0,51Tg-49,64	
N ₂	Tabla 2.2 (Columna 13)	0,265Tg-21,81	
Aire	Resultado de la (Ec. 2.11)	0,262Tg-22,08	
Total	-	-	Qs=

Fuente:(American Petroleum Institute. 2001)

2.6.5 Exceso de Aire (EA) y Humedad Relativa

El cálculo del exceso de aire se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$hum\ a = \frac{Pv\ a\ Tamb}{14,696} \times \frac{HR}{100} \times \frac{18}{28,85} \quad (Ec. 2.7)$$

Donde:

hum a: Humedad del aire.

HR: Humedad de relativa del aire.

Pv a Tamb: Presión de vapor a temperatura a ambiente (lb/pie²) = 0,4598

$$lb\ aire\ hum/lb\ fuel\ req = \frac{aire\ req}{1-hum\ a} \quad (Ec. 2.8)$$

$$lb\ (lb\ Haire)/(lb\ fuel) = lb\ aire\ hum/lb\ fuel\ req - aire\ req \quad (Ec. 2.9)$$

$$lb\ H_2O/lbfuel = H_2O\ form + lbHaire/lbfuel + Vapor\ atomiz \quad (Ec. 2.10)$$

$$EA = \frac{(28,85\ \% O_2) \left(\frac{N_2\ form}{28} + \frac{CO_2\ form}{44} + \frac{H_2O\ form}{18} \right)}{20,95 - \%O_2[(1,6028 \times ((lbHaire/(lb\ fuel))/lbreq)) + 1]} \quad (Ec. 2.11)$$

$$\%EA = \frac{EA}{(Aire\ req)} \times 100 \quad (Ec. 2.12)$$

$$T(lb\ H_2O/lb\ fuel) = \left(\frac{\%EA}{100} \times lb\ Haire/lb\ fuel \right) + lb\ H_2O/lb\ fuel \quad (Ec. 2.13)$$

2.6.6 Rendimiento energético bruto y del combustible

La eficiencia térmica bruta de un sistema horno de proceso se determina mediante la sustitución, en la ecuación 2.3, el valor de calentamiento superior (PCS) en lugar de PCI y añadiendo a Qs un valor igual a 1059,7 unidades térmicas británicas por libra de H₂O multiplicado por la cantidad de libras de H₂O formadas en la combustión del combustible:

$$e_{bruta} = \frac{(PCS + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs + H_2O \times 1059,7)}{(PCS + Ha + Hm + Hf)} \quad (Ec. 2.14)$$

Sin embargo,

$$PCS = PCI + H_2O \times 1059.7 \quad (Ec. 2.15)$$

Haciendo esta sustitución, la ecuación 2.10 se reduce a lo siguiente:

$$e_{bruta} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCI + Ha + Hm + Hf) + H_2O \times 1059,7} \quad (Ec. 2.16)$$

Sustituyendo en la Ec 2.16:

$$e_{bruta} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCS + Ha + Hm + Hf)} \quad (Ec. 2.17)$$

Donde:

e_{bruta} : Rendimiento energético bruto, expresada en (%),

PCS: poder calórico superior (kJ/kg),

El rendimiento energético del combustible de un calentador encendido se encuentra al dividir el calor total absorbido por la entrada de calor debido únicamente a la combustión del combustible. El rendimiento energético del combustible puede determinarse eliminando los factores de corrección del calor sensible para el aire, el combustible y el vapor del denominador de la ecuación 2.3.

Por lo tanto:

Capítulo II: Metodología de trabajo

$$e_{fuel} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCI)} \quad (Ec. 2.18)$$

Donde:

e_{fuel} = eficiencia del combustible, expresado (%).

2.6.7 Rendimiento global del horno

$$n_{global} = \frac{\sum_i e_i \times Q_i}{\sum_i Q_i \times i} \quad (Ec. 2.19)$$

Siendo,

i : Número de cámaras (unidad).

Q_i : Caudal volumétrico procesado en cada cámara (m^3/h).

e_i : Eficiencia individual (%).

n_{global} : Eficiencia global de hornos (%).

2.7 Cálculo del ahorro de combustible

El fuel oil es un combustible que es vendido por la refinería a CUPET a 39,18 CUC/barril, por lo que se hace necesario conocer el ahorro que se obtendrá cuando se logre restablecer los parámetros operacionales a las condiciones óptimas. Para determinar el ahorro de combustible se debe determinar el consumo de combustible que tendrán los hornos cuando los parámetros operacionales se restablezcan a las condiciones óptimas. Posteriormente se calcula la diferencia entre el consumo de combustible actual y el calculado anteriormente. Si se desea conocer cuánto dinero representa este ahorro entonces se multiplicará por el precio actual del fuel oil.

$$Ahorro\ fuel = \dot{V}_a - \dot{V}_{co} \quad (Ec. 2.20)$$

Donde:

$\dot{V}_a$: Flujo volumétrico del consumo de combustible actual (m^3/h).

$\dot{V}_{co}$: Flujo volumétrico del consumo de combustible en condiciones óptimas (m^3/h).

$$\delta = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (Ec. 2.21)$$

Donde:

Capítulo II: Metodología de trabajo

δ : Densidad del combustible.

$\dot{m}$: Flujo másico.

$\dot{V}$: Flujo volumétrico.

Capítulo 3



CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se realiza el cálculo del rendimiento energético de los hornos, luego se analiza el diagnóstico realizado a los mismos para proponer un plan de mejora que conlleve a un mejor funcionamiento del horno y así disminuir el consumo de combustible de los mismos.

3.1 Datos de operación del F-01-101 (T-102 I, II, III) y composición del combustible

Profundizando en la norma API STD 560, se observó que la misma contempla mediante el ejemplo F.3.2.1 en el escenario donde solo se quema fuel oil (FO). En este caso solo trabajaremos con FO ya que el gas combustible de la refinería no tiene el PCI para darle la temperatura necesaria a los productos derivados del petróleo en la refinación. Para esto, se procedió a realizar el balance completo de energía a las cámaras del F-01-101 de la (T-102 I, II, III). En la tabla 3.1 y 3.2 se muestran los datos del horno en operación y la composición del fuel.

Tabla 3.1: Datos operación del F-01-101 (T-102 I, II, III).

Cámaras	F-01-101 (T-102- I)	F-01-101 (T-102- II)	F-01-101 (T-102- III)
Combustible	Fuel oil		
Temperatura (°C)	160		
Presión (kgf/cm ²)	5,3	5	5,2
Flujo (m ³ /h)	1,548	1,248	1,333
Atomizador	vapor sobrecalentado		
Temperatura del vapor (°C)	190		
Presión kgf/cm ²	7		
Consumo de vapor por atomización por fuel (kg/kg comb.)	0,25		
Temperatura de gases de combustión (°C)	472	425	470
Cantidad O ₂ en la cámara de combustión (%)	8	7	9
Temperatura del aire (°C)	26		
Humedad relativa del aire (%)	66		
Presión de vapor a temperatura ambiente (lb/pulg ²)	0,4598		

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo III: Análisis de resultados

En el laboratorio de la refinería se le realiza un análisis elemental al combustible donde se obtiene los datos que se muestran en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Composición del fuel oil.

C (%)	83,10	H (%)	11,00	O (%)	0,70	N (%)	0	S (%)	2,12
Cenizas (%)	0,10	Humedad (%)	3,00	Densidad (g/cm³)	0.96	PCI (kcal/kg)	9707,0	Gravedad (API)	16,50

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Cálculo del rendimiento energético del F-01-101 (T-102 I, II, III)

El cálculo del rendimiento energético se realiza en el F-01-101 (T-102 I) y en los F-01-101 (T-102 II y III) se utiliza la misma metodología de cálculo y sus resultados se muestran en la Tabla 3.3. En la Tabla 3.2 se determinan las cantidades de aire requerido, CO₂, H₂O y N₂ formados en la combustión. Posteriormente se procede al cálculo del exceso de aire que se necesita para la combustión como se muestra a continuación:

La humedad del aire (*hum a*) se calcula por la ecuación 2.7.

$$hum\ a = \frac{Pv\ a\ Tamb}{14,696} \times \frac{HR}{100} \times \frac{18}{28,85} = \frac{0.4598}{14,696} \times \frac{66}{100} \times \frac{18}{28,85} = 0,013 \frac{lbhum}{lbair}$$

$$Pv\ a\ Tamb: \text{Presión de vapor a temperatura ambiente (lb/pulg}^2) = 0,4598$$

Obtenida la *hum a* se calcula *lb aire hum/lb fuel req*, *lb aire hum/lb fuel req* y *lb H₂O/lb fuel* por las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10.

$$lb\ aire\ hum/lb\ fuel\ req = \frac{aire\ req}{1 - hum\ a} = \frac{13,38}{1 - 0,013} = 13,56$$

$$lb\ (lb\ Haire)/(lb\ fuel) = (lb\ aire\ hum) / (lb\ fuel\ req) - aire\ req = 13,56 - 13,38 = 0,18$$

$$lb\ H_2O/lb\ fuel = H_2O\ form + lb\ Haire/lb\ fuel + Vapor\ atomiz = 1,64 + 0,18 + 0.25 = 2,07$$

Para obtener la corrección de exceso de aire se utilizan las ecuaciones. 2.11, 2.12 y 2.13.

$$EA = \frac{(28,85\ \% O_2) \left(\frac{N_2\ form}{28} + \frac{CO_2\ form}{44} + \frac{H_2O\ form}{18} \right)}{20,95 - \% O_2 \left[(1,6028 \times ((lb\ Haire)/(lb\ fuel)) / lb\ req) + 1 \right]} = \frac{(28,85 \times 8) \left(\frac{10,297}{28} + \frac{3,083}{44} + \frac{1,64}{18} \right)}{(20,95 - 8) \left[(1,6028 \times \frac{0,18}{13,38}) + 1 \right]} = 9,23\ lb\ \frac{EA}{lb\ fuel}$$

Capítulo III: Análisis de resultados

$$\%EA = \frac{EA}{Aire\ req} = \frac{9,23}{13,38} \times 100 = 68,98\%$$

$$T(lb\ H_2O/lb\ fuel) = \left(\frac{\%EA}{100} \times lb\ Haire/lb\ fuel \right) + \frac{lb\ H_2O}{lb\ fuel} = \left(\frac{68.98}{100} \times 0,18 \right) + 2,07 = 2,19$$

Tabla 3.2: Cálculo de los productos de la combustión.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fracción Volumen	Peso molecular	Peso total	Valor PCI	PCI	Aire	Aire requerido	CO ₂	CO ₂ formado	H ₂ O	H ₂ O formado	N ₂	N ₂ formado
		lb/mol	lb	BTU/lb	BTU	lb aire/ lb fuel	lb	lb _{CO2} / lb fuel	lb	lb _{H2O} / lb fuel	lb	lb _{N2} / lb fuel	lb
C		12,00	0,831	-	-	11,51	9,55	3,66	3,04	-	-	8,85	7,35
H₂		2,02	0,11	51600	567 6	34,29	3,77	-	-	3,94	0,98	26,4	2,90
O₂		32,00	0,007	-	-	-4,32	-0,03	-	-	-	-	-	-0,023
N₂		28,00	0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00	0
CO		28,00		4345		2,47		1,57				1,90	
CO₂		44,00		-		-		1,00		-		-	
CH₄		16,00		21500		17,24		2,74		2,25		13,3	
Etano		30,10		20420		16,09		2,93		1,80		12,4	
Etileno		28,10		20290		14,79		3,14		1,28		11,4	
Acetileno		26,00		20740		13,29		3,38		0,69		10,2	
Propano		44,10		19930		15,68		2,99		1,63		12,1	
Propileno		42,10		19690		14,79		3,14		1,28		11,4	
Butano		58,10		19670		15,46		3,03		1,55		11,9	
Butileno		56,10		19420		14,79		3,14		1,28		11,4	
Pentano		72,10		19500		15,33		3,05		1,50		11,8	
Hexano		86,20		19390		15,24		3,06		1,46		11,7	
Benceno		78,10		17270		13,27		3,38		0,69		10,3	
Metanol		32,00		8580		6,28		1,38		1,13		4,98	
Amoniaco		17,00		8000		6,10		-		1,59		5,51	
S		32,10	0,212	-	-	4,31	0,092	2,00	0,043	-	-	3,31	0,07
H₂S		34,10		6550		6,08		1,88		0,53		4,68	
H₂O		18,00	0,66	-	-	-	-	-	-	1,00	0,66	-	-
Total lb			1				13,38		3,083		1,64		10,297

Capítulo III: Análisis de resultados

Tomando como referencia la Tabla 2.3 se calculan las pérdidas de los gases de la chimenea.

Componente	1	2	3
	lb form/lb de fuel	Entalpía a T(BTU/lb form)	Contenido de calor (BTU/lb fuel)
CO ₂	3,083	0,269Tg-29,69=207,460	639,599
H ₂ O	2,19	0,51Tg-49,64=399,976	875,947
N ₂	10,297	0,265Tg-21,81=211,814	2181,049
Aire	9,23	0,262Tg-22,08=208,899	1928,138
Total	-	-	Qs=5624,733

$$Q_s = 5624,733 \text{ BTU/lb} = 13077,879 \text{ kJ/kg}$$

Con los valores de PCI , Ha , Hf , Hm , Qr y Qs según la ecuación 2.3 se determina el cálculo del rendimiento energético neto del F-01-101 (T-102 I).

$$e_{neta} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCI + Ha + Hm + Hf)} \times 100$$

$$e_{neta} = \frac{(40641,6 + 1,005 + 0,027 + 55,35) - (609,624 + 13077,879)}{(40641,6 + 1,005 + 0,027 + 55,35)} \times 100 = 66,4 \%$$

El cálculo del rendimiento energético del combustible se determina por Ec. 2.18.

$$e_{fuel} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCI)} \times 100 = 66,5 \%$$

El rendimiento energético bruto se determina por ecuación 2.17, desglosando de la ecuación 2.15 se calcula el poder calórico superior.

$$PCI = 40641,6 \text{ kJ/kg} = 17472,74 \text{ BTU/lb}$$

$$PCS = PCI + (1,64 \times 1059,1) = 17472,74 + (1,64 \times 1059,1) = 19210,65 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = 44645,55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$e_{bruto} = \frac{(PCI + Ha + Hf + Hm) - (Qr + Qs)}{(PCS + Ha + Hm + Hf)} \times 100$$

$$e_{bruto} = \frac{(40641,6 + 1,005 + 0,027 + 55,35) - (609,624 + 13458,058)}{(44645,55 + 1,005 + 0,027 + 55,35)} \times 100 = 60,4 \%$$

Capítulo III: Análisis de resultados

Tabla 3.3: Resultados de eficiencias de los hornos F-01-101 (T-102 II y III).

Cámaras	e_{neta}	e_{fuel}	e_{bruta}
F-01-101 (T-102 II)	71,7	71,8	65,3
F-01-101 (T-102 III)	67,6	67,7	61,5

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Cálculo del rendimiento energético global del F-01-101 (T-102 I, II, III).

El cálculo del rendimiento energético global se realiza por la ecuación 2.19.

$$n_{global} = \frac{\sum_i e_i \times Q_i}{\sum_i Q_i \times i}$$
$$n_{global} = \frac{(66,4 + 71,7 + 67,6) \times (1,486 + 1,248 + 1,333)}{(1,486 + 1,248 + 1,333) \times 3} = 68,6\%$$

Con el cálculo del rendimiento global se determina que el F-01-101 (T-102 I, II, III) es ineficiente, ya que se encuentra 8,4 % por debajo del rendimiento de diseño. También se puede observar que las mayores pérdidas se encuentran en las relaciones con el exceso de aire en la combustión.

3.4 Problemas que afectan al rendimiento energético del F-01-101 (T-102 I, II, III).

Después de realizado el diagnóstico inicial se detectaron los siguientes problemas:

- ❖ Exceso de tiro de los humos de combustión a - 64 kg/m².
- ❖ Alta velocidad de los humos de combustión a 11 m/s.
- ❖ Baja presión de los humos de escape en la entrada de la caldera recuperadora a - 79 kg/m².
- ❖ Baja presión de los humos de escape en la salida de la caldera recuperadora a - 91 kg/m².
- ❖ Alto contenido de O₂ en la salida de los gases de combustión de 7 - 9 %.
- ❖ Bajo contenido de CO₂ en la salida de los gases de combustión.
- ❖ Existencia de picaduras en la carcasa.
- ❖ Tubuladuras mal calafateadas.
- ❖ Losas refractarias defectuosas.
- ❖ Ensuciamiento en los sopladores de limpieza y deshollinado.

- ❖ Juntas defectuosas.
- ❖ Ingresos de aire parásito en las cámaras.
- ❖ Combustión incompleta del FO por deficiencias en la atomización debido a presencia de agua condensada en las líneas de vapor ocasionando deposición de gotas de FO en boquillas y luego generando coque sobre las mismas impidiendo la formación de un correcto formato de llamas.

3.5 Plan de mejora para aumentar rendimiento energético del F-01-101 (T-102 I, II, III).

Del total de energía utilizada en una refinería las pérdidas más importantes son de 80 a 90 % del total procede de combustibles líquidos y gaseosos quemados en hornos de proceso o calderas. Además, este es el proceso con mayor nivel térmico y, por lo tanto, con mayores pérdidas de energía. Cualquier mejora introducida en el diseño de estos equipos produce sustanciales ahorros de energía. Las acciones encaminadas al ahorro de energía en refinerías en operación deben tener como principal objetivo la optimización del funcionamiento de los centros de consumo de combustible existentes.

Las siguientes consideraciones, en general, son válidas tanto para hornos, como para las calderas.

El rendimiento en estos equipos, será máximo cuando las pérdidas por los humos y por las paredes sean mínimas.

1. Mejoras en las pérdidas por las paredes

Las mejoras que pueden introducirse son bastante limitadas, y se reducen a las acciones encaminadas a la disminución de estas pérdidas, mejorando el aislamiento de las paredes del horno. Por supuesto, la decisión dependerá del resultado de un estudio económico previo. Existen en el mercado mantas de fibras cerámicas con poco espesor, de rápida y fácil aplicación sobre el refractario existente, lo que puede ser una de las soluciones más prácticas para este tipo de problemas.

- ❖ Renovar en la medida de lo posible el material refractario de todos los conductos y paredes de los hornos.
- ❖ Adquisición de equipamiento para trabajos de limpieza en sección radiante y convectiva en períodos de reparación y limpiezas en línea; es decir sin detener los equipos.

Capítulo III: Análisis de resultados

- ❖ Eliminar el ensuciamiento de sopladores de limpieza y hollín.
- ❖ Eliminar puntos calientes en la secciones de radiación y convección.

2. Mejoras en las pérdidas por los humos de combustión

Mejorar los sistemas de alimentación de combustible, gas combustible y fuel oil, con el objetivo de eliminar impurezas mecánicas y químicas.

- ❖ Incluir analizadores de gases de CO en la línea combustión.
- ❖ Calibrar analizadores de gases O₂ que se encuentran en línea.
- ❖ Eliminar infiltraciones de aires parásitos en la cámara de combustión.
- ❖ Trabajar con el exceso de aire recomendado por diseño.

Exceso de aire.

Es recomendable, operar con valores mínimos de exceso de aire. Sin embargo, la disminución de este tiene un límite, ya que por debajo de un cierto valor del caudal de aire propio para cada quemador las emisiones de monóxido de carbono y partículas sólidas crecen muy rápidamente. Estas emisiones tienen el doble inconveniente de ser contaminantes de la atmósfera, y de provocar el ensuciamiento de la sección de convección. Para ajustar el exceso de aire al mínimo permitido por este concepto, es conveniente instalar analizadores de inquemados, que permiten establecer la curva característica para los quemadores instalados y establecer así el punto óptimo de funcionamiento.

Otro límite en la reducción del exceso de aire es la duración de los tubos del serpentín de la sección de radiación porque como es sabido, el flujo de calor que reciben los tubos no es uniforme. Por consiguiente, se propone disminuir el contenido de O₂ en los gases de combustión a su porcentaje de diseño ya que es una de las mayores causas que provoca pérdidas en los gases de combustión aumentando así el gasto de combustible (ver anexo 11).

3. Mejoras en la velocidad de los humos de combustión

Las presiones bajas de los tiros que hoy presentan el F-01-101 (T-102 I, II, III) es unos de los factores principales que afectan a las velocidades de gases de combustión y a su vez al rendimiento energético del mismo, por esto es recomendable:

- ❖ Regular el tiro de la chimenea a su presión de diseño.
- ❖ Regular el tiro de entrada en la caldera recuperadora a - 30 kg/m².

Capítulo III: Análisis de resultados

- ❖ Regular el tiro de salida en la caldera recuperadora a - 40 kg/m².

Con estas propuestas de mejoras se pretende aumentar el rendimiento energético del horno F-01-101 (T-102 I, II, III) y por consiguiente se disminuye el consumo de combustible.

3.7 Cálculo del ahorro de combustible

El cálculo del ahorro de combustible se realiza de la siguiente manera:

Datos:

Precio del fuel: 39,18 CUC/barril

Densidad: $\delta = 0,96 \text{ g/cm}^3 = 960 \text{ kg/m}^3$

$\dot{m}_{\text{diseño}} = 1400 \text{ kg/h}$

Flujo Volumétrico($\dot{V}$) de:

$\dot{V} [F - 01 - 101 (T - 102 I)] = 1,548 \text{ m}^3/\text{h}$

$\dot{V} [F - 01 - 101 (T - 102 II)] = 1,248 \text{ m}^3/\text{h}$

$\dot{V} [F - 01 - 101 (T - 102 III)] = 1,333 \text{ m}^3/\text{h}$

Despejando por la ecuación 2.21 se obtiene el flujo volumétrico de diseño ($\dot{V}_{\text{diseño}}$).

$$\dot{V}_{\text{diseño}} = \frac{\dot{m}}{\delta}$$

$$\dot{V}_{\text{diseño}} = \frac{1400 \text{ kg/h}}{960 \text{ kg/m}^3} = 1,338 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tomando como referencia la ecuación 2.20 se calcula el ahorro de combustible.

$$\text{Ahorro fuel} = \dot{V}_a - \dot{V}_{co}$$

$$\dot{V}_a = \dot{V}[F - 01 - 101 (T - 102 I)] + \dot{V}[F - 01 - 101 (T - 102 II)] + \dot{V}[F - 01 - 101 (T - 102 III)]$$

$$\dot{V}_a = 1,548 \text{ m}^3/\text{h} + 1,248 \text{ m}^3/\text{h} + 1,333 \text{ m}^3/\text{h} = 4,129 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{co} = 3 \times \dot{V}_{\text{diseño}} = 3 \times 1,338 \text{ m}^3/\text{h} = 4,014 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Ahorro fuel} = 4,129 \text{ m}^3/\text{h} - 4,014 \text{ m}^3/\text{h} = 0,115 \text{ m}^3/\text{h}$$

Cálculo por día:

Capítulo III: Análisis de resultados

$$1 \text{ d} = 24 \text{ h/d}$$

$$\text{Ahorro fuel diario} = \text{Ahorro fuel} \times 24 \text{ h/d}$$

$$0,115 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/d} = 2,76 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$2,76 \text{ m}^3/\text{d} \times 6,1106 \text{ m}^3/\text{barril} = 16,865 \text{ barril/d}$$

$$16,865 \text{ barril/d} \times 39,18 \text{ CUC/barril} = 660,78 \text{ CUC/d}$$

Cálculo por año:

$$1 \text{ año} = 365 \text{ d/año}$$

$$\text{Ahorro de fuel anual} = \text{Ahorro fuel diario} \times 365 \text{ d/año}$$

$$660,778 \text{ CUC/d} \times 365 \text{ d/año} = 241183,97 \text{ CUC/año}$$

La refinería Camilo Cienfuegos ahorraría 241 183, 97 CUC/año en el F-01-101 (T-102 I, II, III).

Conclusiones



CONCLUSIONES GENERALES

Al concluir el trabajo se arriba a las siguientes conclusiones:

1. A partir del análisis bibliográfico se pudo determinar que los parámetros que sustentan la eficiente operación de los hornos industriales en una refinería de petróleo es operar con una velocidad de los gases de combustión adecuada cerca 7,6 m/s , mantener de 2 – 3 % de O₂ en los gases de combustión, tener temperatura de los gases de combustión adecuada, que exista una buena combustión dentro de la cámara del horno los refractarios se encuentre en buen estado para que no halla elevadas pérdidas de calor de radiación y los dâmpers que estén en buen estado controlen el tiro de combustión del mismo que tiene que estar - 0,1 pulg H₂O en el arco radiante.
2. Al realizar el diagnóstico del horno se pudo determinar que el porcentaje O₂ está por encima del establecido, la temperatura de los gases combustión cumple los parámetros operacionales, pero necesitan ser actualizados ya que en otras bibliografías son más bajas, reajustar el tiraje del horno y lo propuesto por diseño.
3. Al calcular el rendimiento energético del F-01-101 (T-102 I, II, III), utilizando los parámetros operacionales actuales, se pudo observar que está operando ineficientemente pues los valores obtenidos están por debajo de su rendimiento de diseño en 8,4 %.
4. Se propone un plan de mejora para que los hornos operen cerca de sus parámetros de diseño y así obtener un aumento en su eficiencia y por consiguiente una disminución en el consumo de combustible.
5. Si se restablecen los parámetros operacionales el F-01-101 (T-102 I, II, III) se lograría ahorrar 241 183, 97 CUC/año, lo que en la actualidad se traduce como una pérdida.

Recomendaciones



RECOMENDACIONES

1. Aplicar el plan de mejora como resultado del diagnóstico ejecutado para disminuir las pérdidas mediante la corrección de los parámetros operacionales los cuales conlleva a la ineficiencia del F-01-101 (T-102 I, II, III).
2. Realizar un diagnóstico a los restantes hornos de la sección 600 en aras de identificar y eliminar los problemas de ineficiencia.
3. Incluir el estudio de la regulación automática de los dâmpers y reforzar la instrumentación local.
4. Modernizar los sistemas de limpieza y desdeshollinado.
5. Hacer un estudio de factibilidad para determinar el costo del plan de mejora y el tiempo de recuperación.

Bibliografia



BIBLIOGRAFÍA

1. AChEE, A. C. de E. E. (2015). Guía para calificación de consultores de Eficiencia Energética. Ministerio de Energía.
2. *American Petroleum Institute* (Ed.). (2001). *Fired Heaters for General Refinery Service* (Third.). Washintong, DC.
3. *American Petroleum Institute* (Ed.). (1995). *Burners for Fired Heaters in General Refinery Servicesa* (Fird.). Washintong, DC.
4. *American Petroleum Institute* (Ed.). (2003). *Inspection of Fired Boilers and Heaters* (Second.). Washintong, DC.
5. *American Petroleum Institute* (Ed.). (2008). *Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries* (Sixth.). Washintong, DC.
6. *Baukal, Ch.* (2000). *The John Zink Combustion Handbook*. Tulsa, Oklahoma.
7. Biset, S, S., & Ferreyra, M. (2013). Cálculo riguroso de eficiencia de horno de proceso. AAIQ, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos.
8. Borroto Nordelo, A, A., & Rubio González, A. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara.
9. BTG Slovensko s. r. o., & CUPET. (2007). Instrucciones de servicio, *Operation and maintenance manual*.
10. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (Septima.). México: Interamericana Editores, S.A. Retrieved from www.FreeLibros.me
11. Combustión y Hornos de Procesos. (2008). Venezuela.
12. Cortés Martínez, R, González Ramos, A, & Suárez Delfino, A. (2012). Ingeniería de Procesos. Cienfuegos.
13. Díaz Castrillón, E, Biset, S, Bosani, J. P., & Costa, L. A. (2016). Seguimiento Energético de Hornos de Proceso. In *Petrotecnia* (pp. 15–30).
14. Espinosa Valero, J. P. (2009). Aplicación de la tecnología *pinch* a una unidad de craqueo térmico de crudo. Universidad de Cádiz, España.
15. Garay, A, López, G, Verdi, H, & Vila, V. (2008). Combustión en hornos. Distintos tipos de combustibles.
16. Géniz Vásquez, J. (2011). Calentadores a fuego directo.
17. Golato, M. A., Franck Colombres, F, & Correa, C. A. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor.

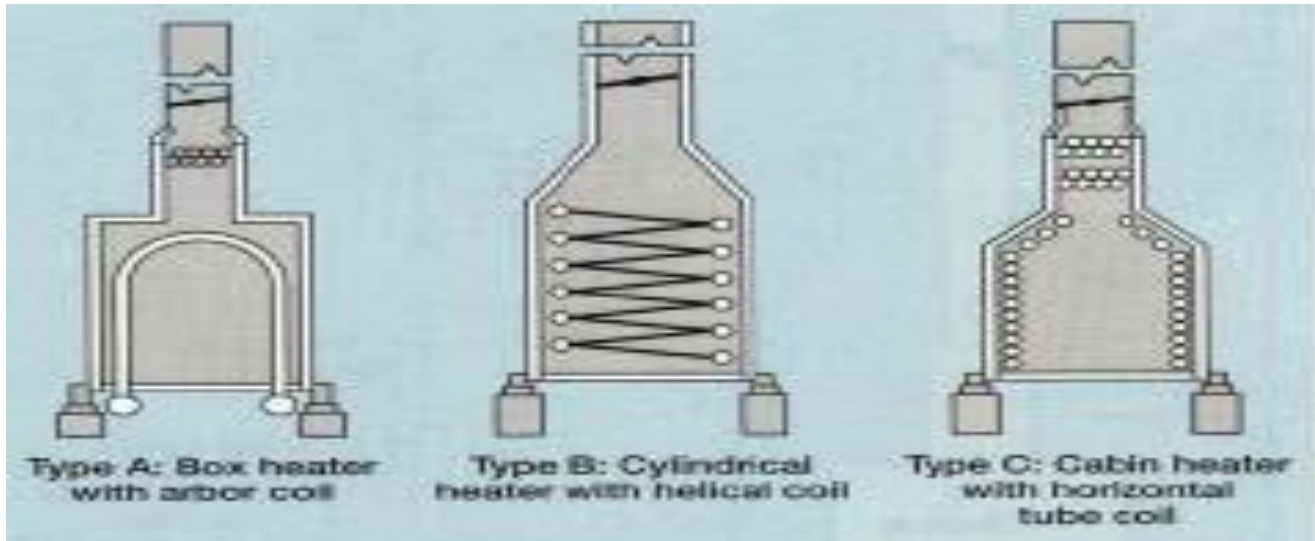
18. Gorra Tostega, I. I. (2009). Análisis energético del calentador a fuego directo BA 1101, para la obtención de la eficiencia, utilizando la metodología de la CONAE.
19. Grupo Gallardo Balboa. (2016). Proyecto para la instalación de una Refinería de Petróleo en Extremadura. Retrieved from <http://www.grupoag.es>.
20. Hornos y Combustión. (2015). Retrieved from <http://operadorpetrolero.blogspot.com>
21. Ingeniería de Calor (Ed.). (2013). Hornos o calentadores a fuego directo (pp. 472–525).
22. Instituto Argentino del Petróleo y el gas. (2015). Seguimiento Energético de Hornos de Proceso. Argentina.
23. KAI, & GIEN. (2013). Ahorro de energía en la industria del refino y petroquímica (p. 26). Colombia: UPME y Colciencias.
24. Kraus, R. S. (2006). Proceso de refino del petróleo. Enciclopedia de salud y seguridad del trabajo. (p. 33). Industrias químicas.
25. Lengipronefhim. (1985). Hornos tubulares y bloque de recuperación de calor.
26. Linares, A. (2016). *Hornos: Cálculo y Diseño*.
27. Martínez, A. (1998). Ahorro de Energía en Refinerías. Revista de Ingeniería Química. Retrieved from: www.alcion.es
28. Nilo Donoso, C. F, & Núñez Lazo, L. (2013). Estudio de pre inversión para desarrollar eficiencia energética en una planta industrial típica. (Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
29. Palacio Toledo, C. I. (2011). Determinación de factores de diseño y operación que influyen en la corrosión y ensuciamiento de horno de proceso tipo cilíndrico vertical. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
30. PDVSA. (1995). Manual de diseño de proceso.
31. Pemex, & Instituto Mexicano de Petróleo. (2004). *Calentadores a fuego directo para plantas de procesos*. México.
32. Tanquero, Díaz, N. (2004). Curso de Hornos Industriales (p. 70). Santo Domingo, Rep. Dominicana: Ingeniería y Servicios Profesionales de Calor del Caribe.
33. UOP Honeywell Company. (2007). *Fired Heaters*.
34. UOP Honeywell Company (Ed.). (2008). *Fired Heaters*.
35. Wauquier, J. P. (2007). El Refino del Petróleo (Díaz de Santos.). España.

Anexos

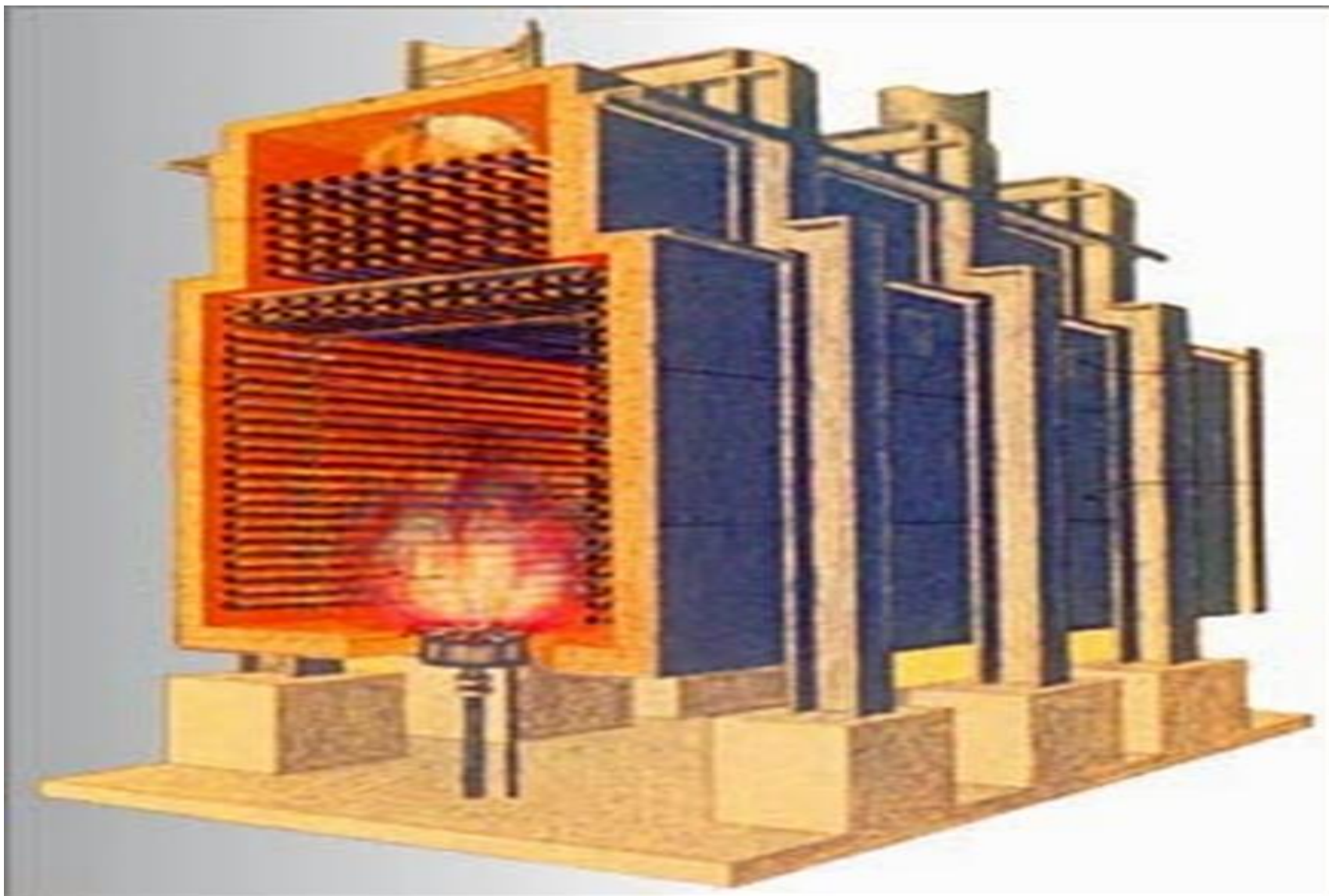


ANEXOS

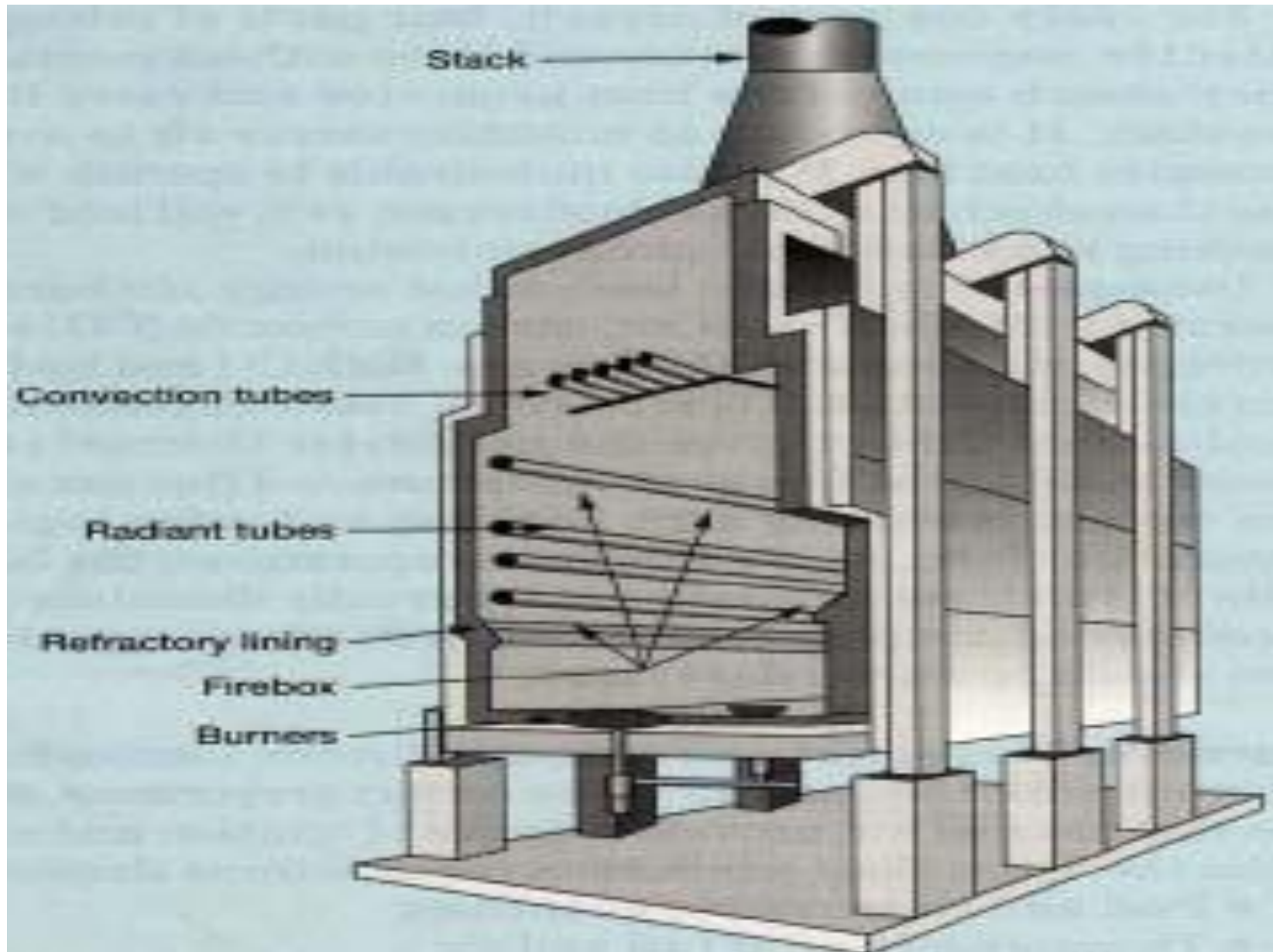
Anexo 1: Diferentes tipos de hornos de procesos. **Fuente:** (Palacio Toledo, C. I. 2011).



Anexo 2: Secciones de un horno de proceso. **Fuente:** (Operador Petrolero. 2015).



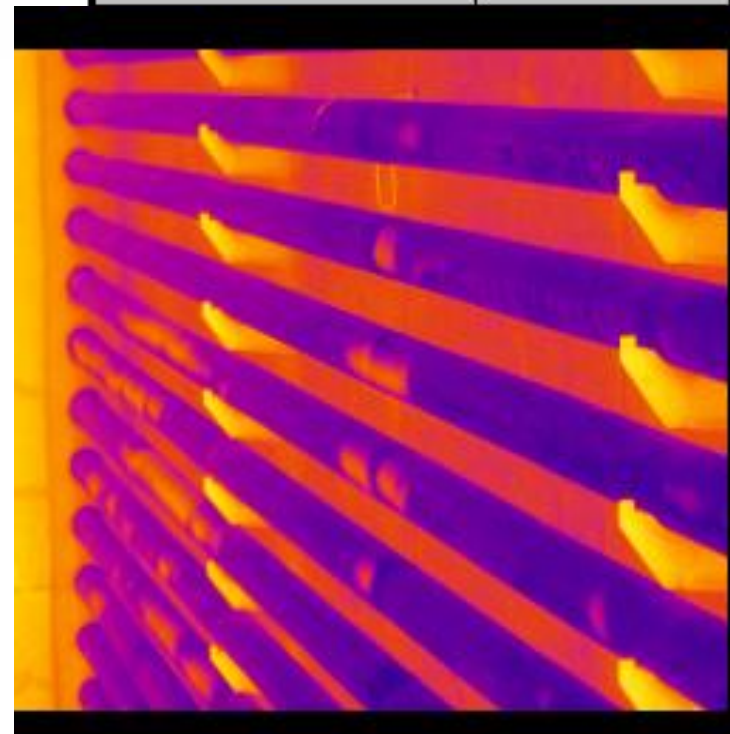
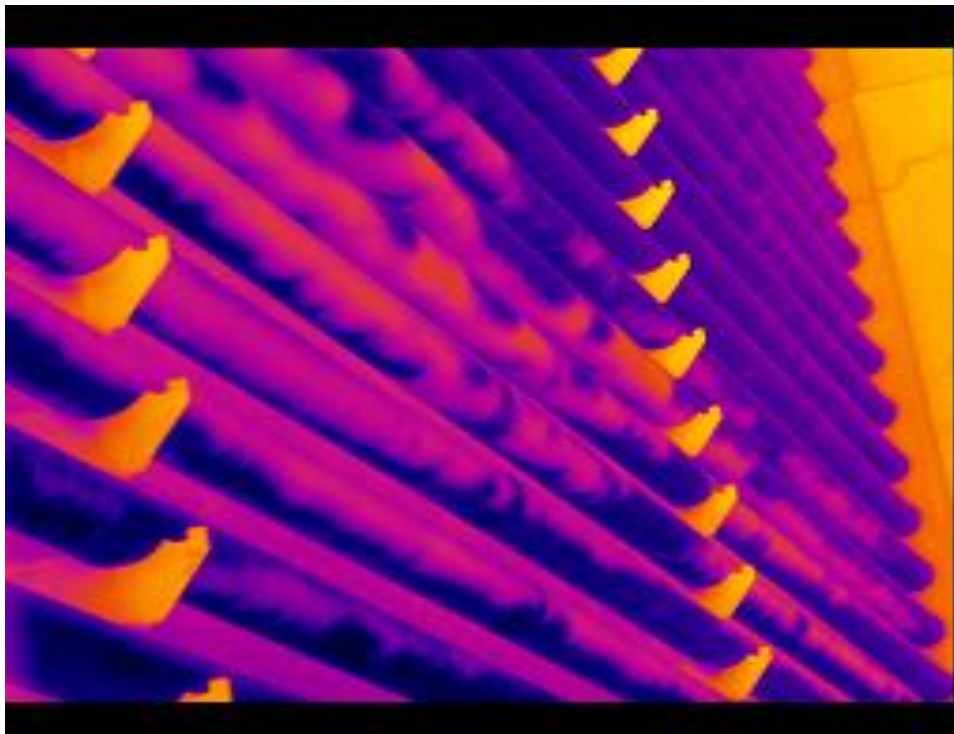
Anexo 3: Ubicación de tubos por cada sección del horno. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA. 2008).



Anexo 4: Inspección Termo-gráfica. **Fuente:** (ESENTERM.ca PDVSA.2008).



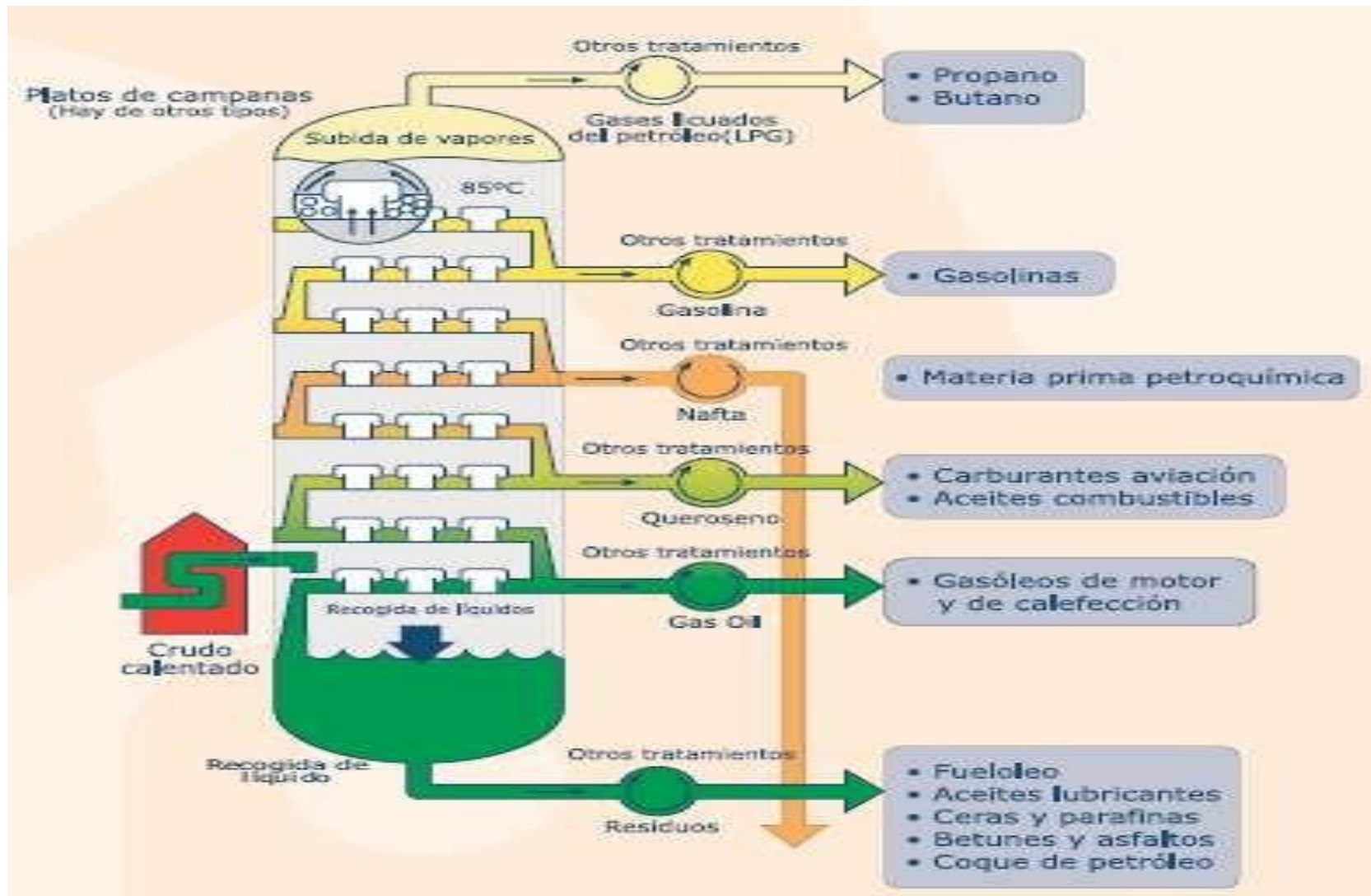
IR information	Value
Date of creation	3/6/2008
Time of creation	9:24:03 AM
File name	Ir_3530.jpg
Object parameter	Value
Emissivity	0.91
Ambient temperature	1403.0°F
Label	Value
LI01 : max	898.7°F
LI02 : max	898.2°F
LI03 : max	910.6°F
LI04 : max	916.6°F



Anexo 5: Medición de temperaturas mediante un termómetro infrarrojo. **Fuente:** (Borroto Nordelo, A, A., & Rubio González, A. 2007)



Anexo 6: Diagrama simplificado de la destilación atmosférica. **Fuente:** (KAI, & GIEN. 2013).



Anexo 7: Diagrama de flujo de la S-100. Fuente: (Cortés Martínez, R, González Ramos, A, & Suárez Delfino, A. 2012).

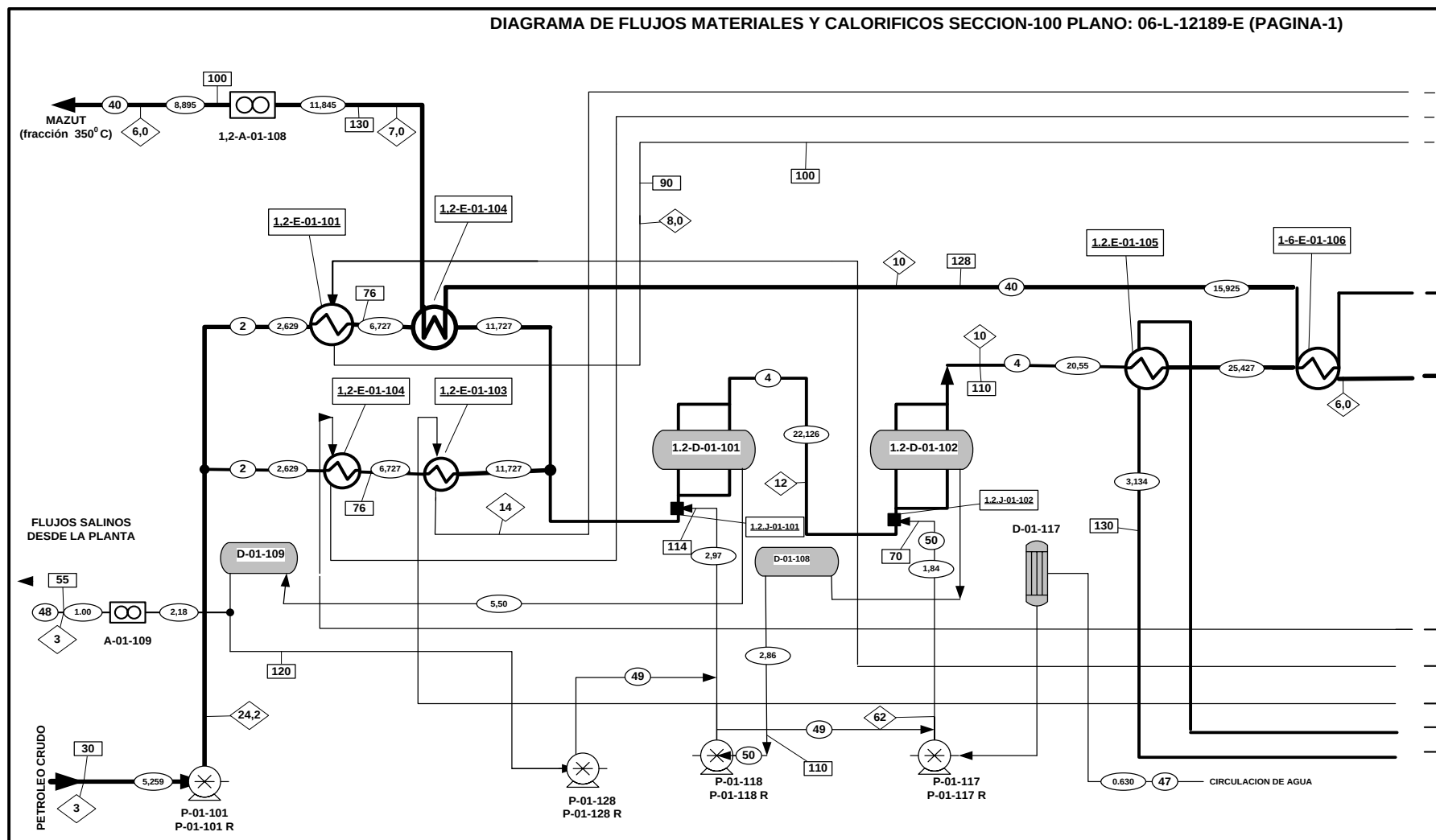


DIAGRAMA DE FLUJOS MATERIALES Y CALORIFICOS SECCION-100 PLANO: 06-L-12189-E (PAGINA-2)

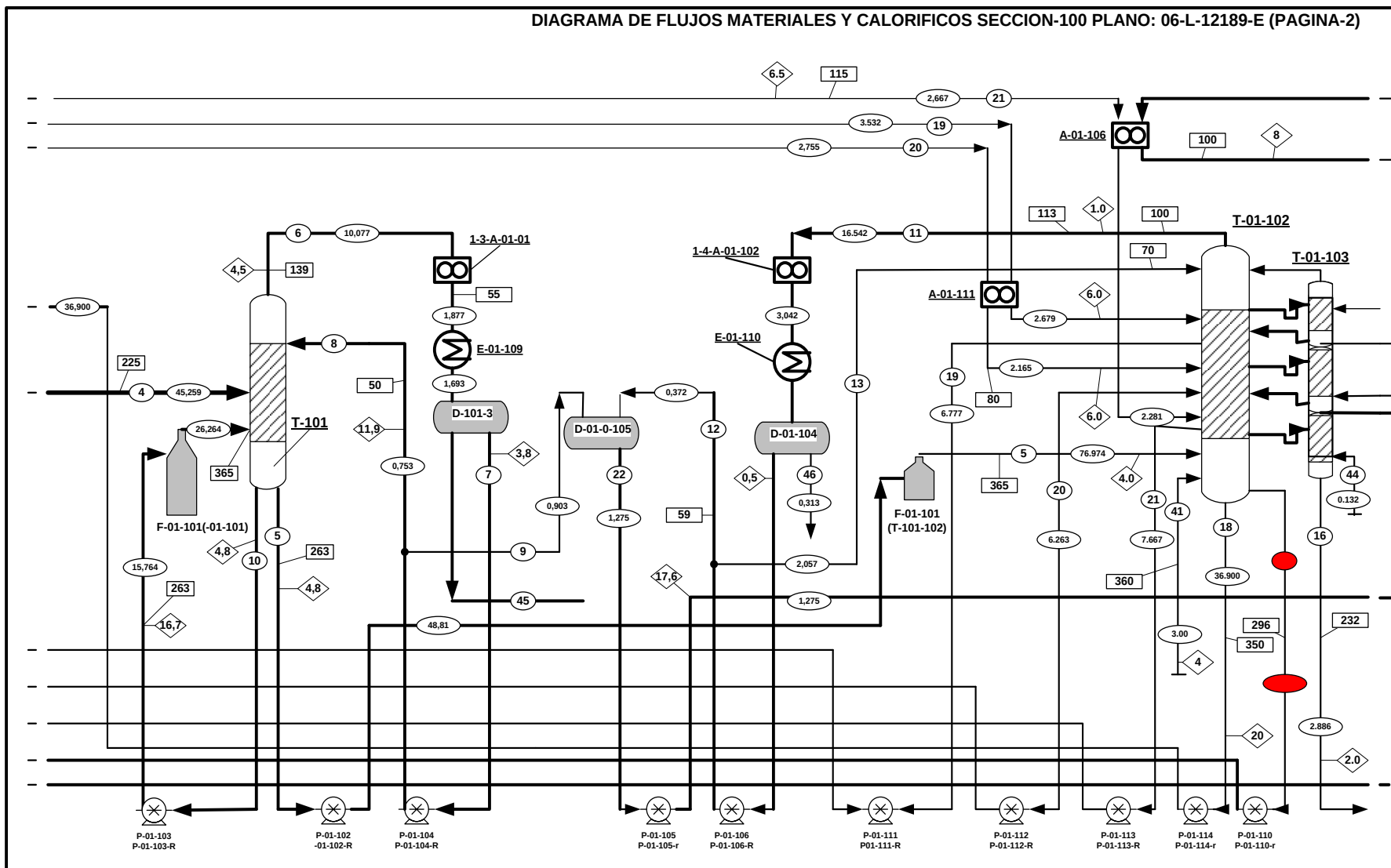
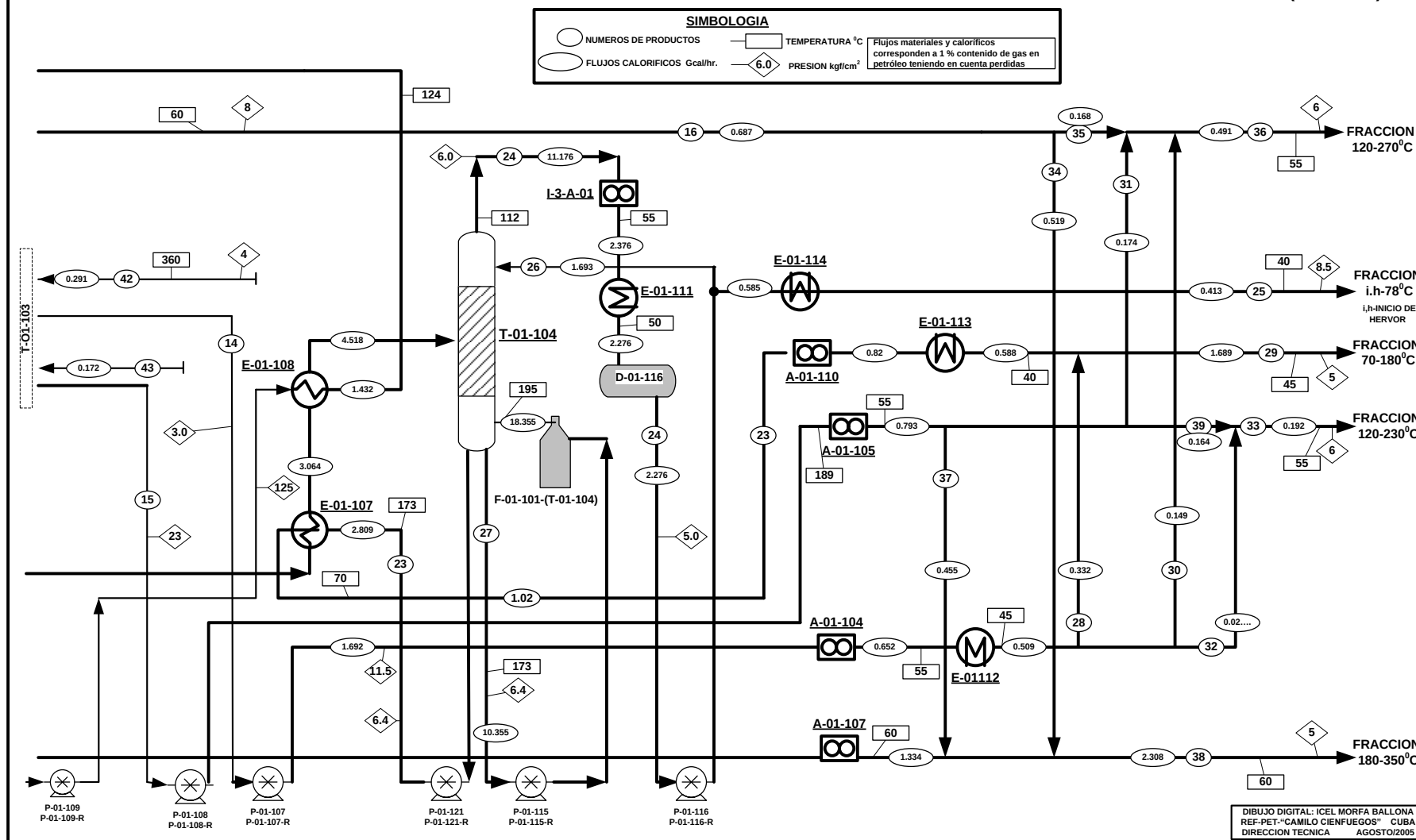


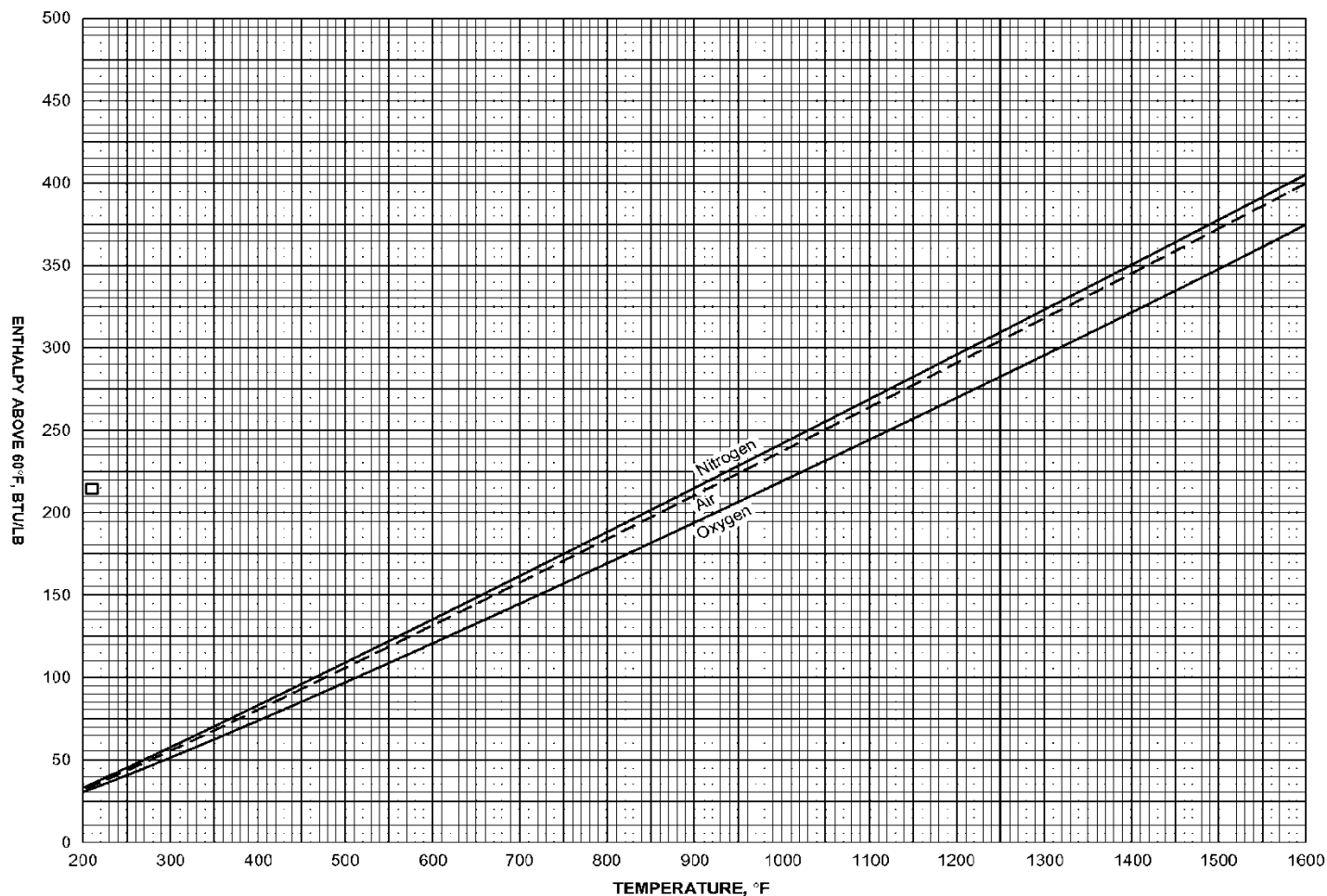
DIAGRAMA DE FLUJOS MATERIALES Y CALORIFICOS SECCION-100 PLANO: 06-L-12189-E (PAGINA-3)



Anexo 8: Imagen del F-01-101 (T-102 I, II, III). **Fuente:** (Elaboración propia).



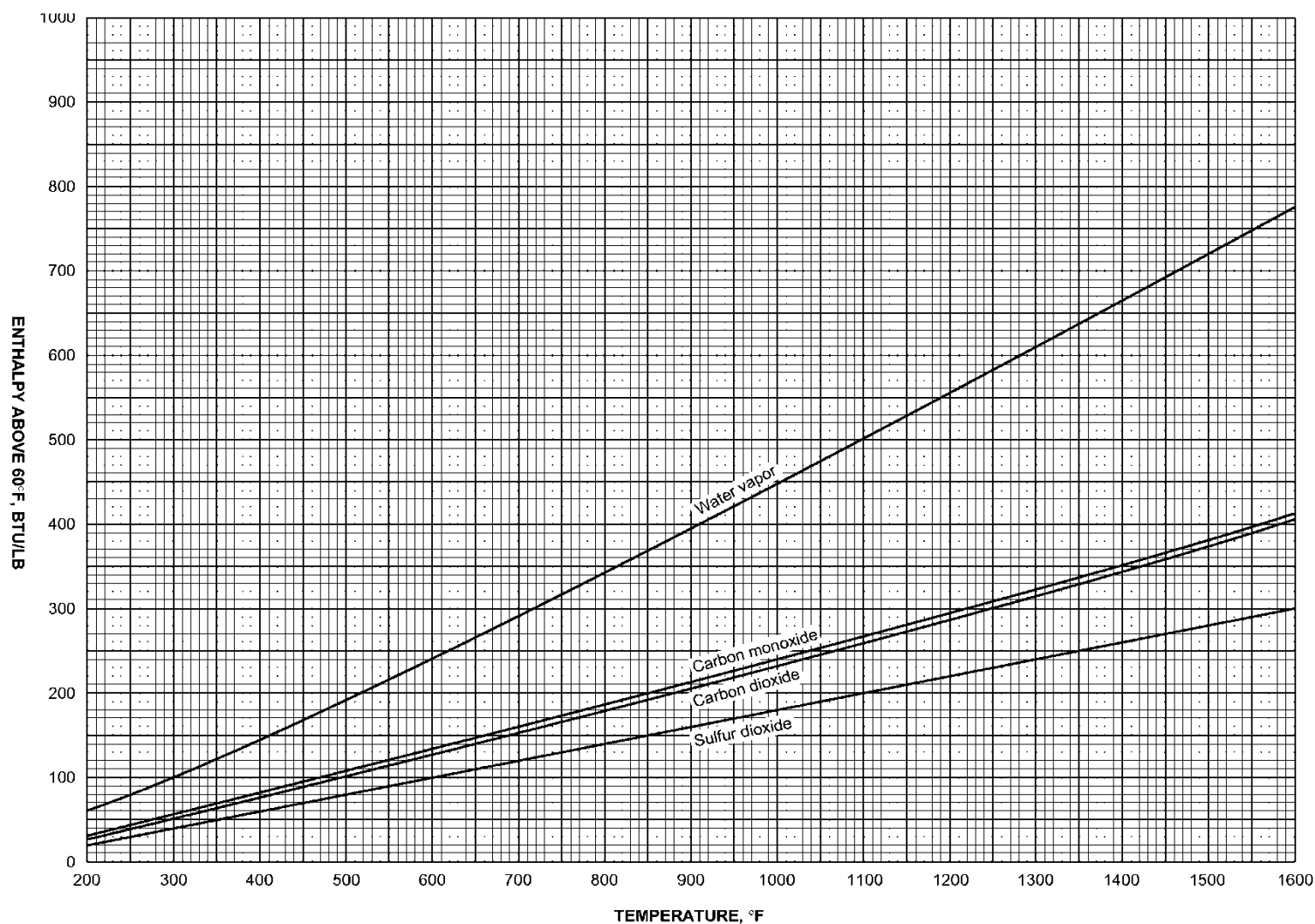
Anexo 9: Tabla Temperatura vs Entalpía de los gases de combustión. **Fuente:** (American Petroleum Institute. 2001).



Note: This figure is taken from the *Technical Data Book—Petroleum Refining* (English edition), Chapter 14, "Combustion," p. 14-25, API, Washington, D.C., 1966.

Figure F.B-2—Enthalpy of Air, O₂, and N₂

Anexo 10: Tabla Temperatura vs Entalpía de los gases de combustión. **Fuente:** (American Petroleum Institute. 2001).



Note: This figure is taken from the *Technical Data Book - Petroleum Refining* (English edition), Chapter 14, "Combustion," p. 14-25, API, Washington, D.C., 1966.

Figure F.B-1—Enthalpy of H₂O, CO, CO₂, and SO₂

Anexo 11: Tabla ahorro de combustible vs oxígeno de gases de combustión. **Fuente:** (AChEE, A. C. de E. E. 2015).

