

Estudio conceptual a los hornos de llama directa instalados en una planta de gas ubicada en
Sabana de Torres

Carolina Rocha Lizarazo y Gustavo José Moreno Reyes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Carlos Augusto Godoy Ruiz

Ingeniero Químico

Codirector

Hernando Guerrero Amaya

PhD en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Agradezco a Dios, por darme salud y fuerzas para continuar ante las adversidades.

A mis padres por su apoyo y por la formación que me brindaron, gracias a ellos soy lo que soy. Esta meta alcanzada es en honor a ellos.

A mi madre por sus consejos, su comprensión y amor.

A mis hermanos porque a pesar de los disgustos siempre están ahí para escucharme y dar su apoyo.

A mis amigos y amigas, mil gracias por todos los momentos vividos, las enseñanzas, el apoyo y por absolutamente todo. Sin ustedes este proceso no hubiera sido lo mismo ¡Siempre los llevo en mi corazón!

Carolina Rocha Lizarazo

Dedico este proyecto a mis padres y abuelos, que mediante su apoyo y sacrificio me forjaron como ciudadano y profesional de bien; que me dieron una palabra de aliento cuando más lo necesitaba y un regaño cuando más lo merecía pero que sin importar las circunstancias siempre estuvieron a mi lado para guiarme y apoyarme durante este proceso.

Gustavo José Moreno Reyes

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, a todos aquellos que contribuyeron a nuestro aprendizaje durante nuestro paso por la vida universitaria, al director de nuestro proyecto Carlos Godoy y a nuestro codirector Hernando Guerrero por ayudarnos a dar este último paso hacia el fin de nuestro pregrado. También, a todos aquellos que con su apoyo y buenos deseos nos permitieron culminar nuestros estudios; sin todos ustedes no habríamos alcanzado este gran logro para nuestras vidas.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
1. Objetivo general.....	15
1.1 Objetivos específicos.....	15
2. Descripción metodológica	16
2.1 Recopilación de datos.....	17
2.1.1 <i>Depuración de la información obtenida</i>	17
2.2 Contextualización bibliográfica	17
2.3 Aspectos que impactan la eficiencia	17
2.3.1 <i>Falla del aislamiento térmico y/o las paredes del equipo (pérdidas de calor con el ambiente)</i>	18
2.3.2 <i>Baja temperatura de entrada de la corriente de aire alimentada al sistema</i>	18
2.4 Planteamiento de las alternativas de mejora	20
2.4.1 <i>Sustituir o reparar parcial o totalmente el aislamiento térmico y/o las paredes de los hornos</i>	20
2.4.2 <i>Precalear la corriente de aire alimentada</i>	23
2.4.2.1 <i>Recuperación directa de calor con los gases de chimenea</i>	23
2.4.2.2 <i>Instalación de un precalentador a la entrada de la corriente de aire. El</i>	24
3.1 Análisis y selección de las alternativas propuestas	28

3.1.1 Sustituir o reparar parcial o totalmente el aislante térmico y/o las paredes de los hornos 28

3.1.2 Precalentar la corriente de aire alimentada29

3.1.3 Modificar la cantidad de aire alimentado32

Referencias bibliográficas36

Apéndices39

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama del ciclo del varsol.	12
Figura 2. Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto.	16
Figura 3. Termografía lateral de los hornos.	18
Figura 4. Temperatura promedio de Sabana de Torres.	19
Figura 5. Vista termográfica y natural del lado derecho del horno.	21
Figura 6. Vista termográfica (A) y natural del lado frontal del horno (B).	21
Figura 7. Aumento de la eficiencia con un cambio aproximado de la temperatura de entrada del aire de 200 Kelvin.	30
Figura 8. Aumento de la eficiencia con un cambio aproximado de la temperatura de entrada del aire de 250 Kelvin.	31
Figura 9. Relación entre la eficiencia y el exceso de aire para el gas natural.	32
Figura 10. Eficiencia calculada con la modificación del flujo de aire (15% de exceso).	33
Figura 11. Eficiencia calculada con la modificación del flujo de aire (3% de exceso).	34

Lista de apéndices

Apéndice A. Termografía lateral de los dos hornos.....	39
Apéndice B. Termografía del costado izquierdo del horno.....	39
Apéndice C. Termografía de la chimenea del horno.....	40
Apéndice D. Termografía frontal del horno.	40
Apéndice E. Regenerador de calor.....	41
Apéndice F. Recuperador de calor.....	41
Apéndice G. Aumento de oxígeno en la alimentación.....	41
Apéndice H. Tabla de composiciones molares y másicas de los gases de combustión y algunas de sus propiedades.	42
Apéndice I. Temperaturas de los gases de chimenea.....	43
Apéndice J. Cálculo de los calores involucrados en el horno y su eficiencia	43
Apéndice K. Tabla con la composición del varsol. Datos tomados de la simulación en Aspen HYSYS®.....	44
Apéndice L. Simulación del intercambio de calor del varsol.....	45
Apéndice M. Especificaciones del diseño del horno de llama directa.....	45
Apéndice N. Relación entre el aumento de la temperatura de alimentación de aire y el aumento de la eficiencia.....	46
Apéndice O. Simulación del proceso completo, respecto al intercambio de calor del horno.	46
Apéndice P. Entalpías estándar de formación de los compuestos del combustible a 298,15 K....	47
Apéndice Q. Capacidades caloríficas de gases en estado de gas ideal, de los compuestos del combustible.....	48

Apéndice R. Calores de la combustión. Datos tomados de la simulación en Aspen HYSYS®. ..48

Apéndice S. Cálculo del aire absorbido por el horno (20% en exceso).....49

Resumen

Título: Estudio conceptual a los hornos de llama directa instalados en una planta de gas ubicada en Sabana de Torres*

Autores: Carolina Rocha Lizarazo, Gustavo José Moreno Reyes**

Palabras clave: Hornos de calentamiento de llama directa, eficiencia térmica, consumo de gas combustible.

Descripción:

En este estudio técnico se realizó un análisis operativo a dos hornos de calentamiento de llama directa donde se identificaron posibles factores que impactan su eficiencia y con base en la literatura asociada a esta tecnología se plantearon alternativas que podrían aumentarla y disminuir su consumo de gas combustible.

Se evidenciaron tres factores que impactan sobre la eficiencia: el desgaste del aislamiento térmico y/o las paredes del equipo, la temperatura y el flujo de la corriente de aire alimentada al sistema.

Se realizó una compilación y depuración de información operativa y en paralelo se realizó una contextualización bibliográfica basada en artículos que permitieron plantear alternativas de mejora.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron como opciones técnicas intervenir el aislamiento térmico; realizar adecuaciones que permitieran ajustar el flujo de aire alimentado e instalar un sistema de calentamiento del aire.

Posteriormente, se elaboró un modelo con las condiciones del proceso haciendo uso del software de simulación Aspen HYSYS[®] que permitió analizar el impacto de las alternativas sobre el sistema.

Finalmente, se obtuvo evidencia que cada alternativa repercute en el ahorro de gas combustible. Para la primera alternativa se estima un ahorro entre 27.103,44 USD y 51.309,07 USD por año. Para la segunda entre 56.856,52 y 73.049,23 USD por año y para la tercera entre 20.899,59 USD y 71.064,14 USD por año.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Ingeniero Químico. Codirector: Hernando Guerrero Amaya. PhD en Electroquímica, Ciencia y Tecnología.

Abstract

Title: Conceptual study of direct flame furnaces installed in a gas plant located in Sabana de Torres*

Authors: Carolina Rocha Lizarazo, Gustavo José Moreno Reyes**

Key words: Direct fired heaters, thermal efficiency, gas consumption.

Description:

This technical study was made by doing an operational analysis of two direct fired heaters in order to identify possible factor that impact their efficiency. Furthermore, possible improvements were raised based on articles and academic information related to these machines in order to increase their efficiency and decrease their gas consumption.

Three factors that impact the efficiency were found; wear of the thermal isolation and / or their walls, the temperature and the flux of the air that is used in the system.

Two sources of information were used: the academic one and the data provided by the company. Then, they were filtered to choose the most important and raise the alternatives.

Based on the filtered information, three alternatives were raised: check and fix the thermal isolation, adjust the air flux and install a pre-heating system to increase the temperature of the air.

Subsequently, a simulation of the process was made on Aspen HYSYS ® to analyze the impact of the alternatives on the efficiency.

Finally, evidence of the impact on the gas consumption was got. The first alternative could save between \$ 27,103.44 / y and \$ 51,309.07 / y, the second between \$ 56,856.52 and \$ 73,049.23 /y and the third one between \$ 20,899.59 / y and \$ 71,064.14 /y.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Chemical engineer. Co-director: Hernando Guerrero Amaya. PhD in Electrochemistry, Science and Technology.

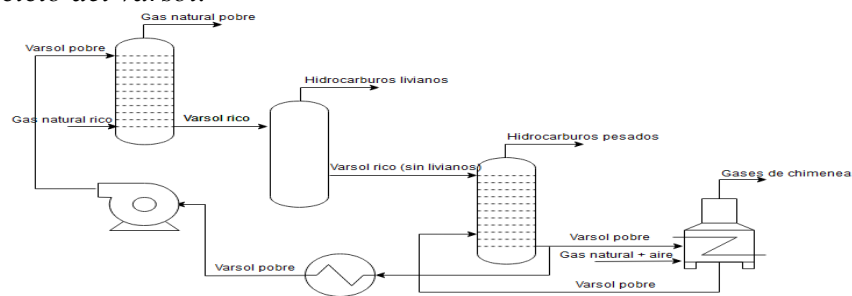
Introducción

En el municipio de Sabana de Torres se encuentra una planta de tratamiento de gas natural proveniente de la actividad petrolera en la cuenca del Magdalena medio llamada “PG-PSC”; dicha planta incorpora un sistema de recuperación y separación de hidrocarburos del gas natural, en el que se utiliza varsol como medio absorbente el cual es calentado en dos hornos de combustión de llama directa.

El varsol pobre es bombeado a la torre de absorción, allí, la corriente es utilizada como medio absorbente para retener los hidrocarburos (propanos, butanos, pentanos y pesados) que se encuentran en una corriente de gas natural rico que se alimenta en contracorriente. Luego, el varsol enriquecido con estos hidrocarburos pasa a una etapa de separación llevada a cabo en una torre desetanizadora en la cual se despojan los más livianos (metano y etano); después, este fluido es enviado a una torre de fraccionamiento en la que se recuperan los hidrocarburos más pesados, posteriormente, la corriente sale por el fondo de la torre y se separa en dos corrientes nuevas; una de ellas es enviada a los hornos de llama directa para ser calentada y alimentada a la torre de fraccionamiento, la otra es utilizada como aceite térmico en los rehervidores de las demás unidades de proceso para ser posteriormente alimentada a la torre de absorción e iniciar el proceso nuevamente.

Figura 1.

Diagrama del ciclo del varsol.



Los hornos de llama directa fueron instalados en la década de los sesenta. Dichos equipos han estado operando de forma continua desde su puesta en marcha. Su alto requerimiento operativo en el transcurso del tiempo y el escaso mantenimiento comparado con su demanda operacional pudieron haber afectado gradualmente su desempeño y eficiencia. Estos equipos no tienen registro de mantenimientos o estudios operativos asociados a su eficiencia durante la última década.

Debido a que se desconoce el desempeño operativo actual de los hornos se decidió realizar un estudio técnico y de esta forma presentar opciones de mejora que podrían aumentar su eficiencia en términos de ahorro de gas combustible, además, se presentan ventajas de cada una de las alternativas que podrían impactar positivamente el desempeño de los hornos en estudio. Las alternativas citadas se lograron evidenciar ya que fueron desarrolladas en estudios hechos a sistemas semejantes.

En la literatura, se identificó una amplia gama de modificaciones que de ser implementadas podrían aumentar la eficiencia de sistemas de combustión, como lo mencionado en el artículo “How to boost the performance of fired heaters” (Garg, 1989) donde se describen varias alternativas de mejora para sistemas que incorporan hornos de combustión de llama directa. En éste, se exploran alternativas como: instalar una sección de convección o aumentar su tamaño, instalar un precalentador de aire e instalar un regenerador de gases de chimenea (Filipponi et al., 2016).

Además, como constata en la investigación hecha por la empresa estadounidense “Thermcraft” llamada («The Importance of Using High Temperature Insulation Materials in Furnaces», s. f.), recomiendan tener en cuenta que el aislante juega un papel crucial en este tipo de equipos puesto que evita que se pierda el calor generado por la reacción de combustión con los alrededores.

En este proyecto se adoptarán las alternativas que mejor se ajusten tanto a los hornos en estudio como a sus condiciones de operación, desgaste y demás factores que se deban tener en cuenta para su selección.

1. Objetivo general

Realizar un estudio conceptual a los hornos de llama directa instalados en una planta de gas natural ubicada en Sabana de Torres.

1.1 Objetivos específicos

Describir el estado operativo de los hornos de llama directa en estudio mediante la compilación de información de campo para obtener una línea base de sus condiciones operativas actuales.

Identificar las soluciones tecnológicas previamente realizadas en equipos de características semejantes a través de una revisión bibliográfica que pueda brindar reducciones en el consumo de gas combustible.

Analizar las posibles soluciones seleccionadas para los hornos de calentamiento haciendo uso de casos de éxito y de un modelo de simulación para evidenciar su grado de impacto sobre la eficiencia de la combustión en los hornos.

2. Descripción metodológica

El estudio operativo de los hornos de llama directa se llevó a cabo realizando una compilación de información en campo (en el sitio) sobre su estructura, el registro histórico de los datos operacionales y una verificación visual de la operación de los equipos.

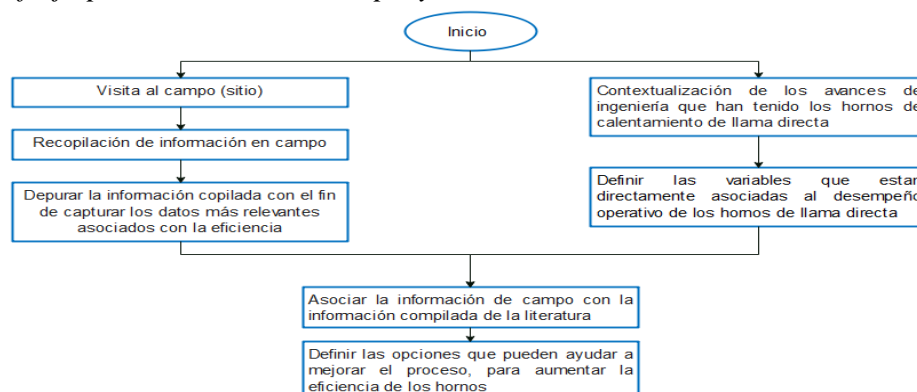
Posteriormente, se realizó una depuración de la información compilada con el fin de capturar los datos más relevantes asociados directamente a la eficiencia operativa de los equipos en relación al consumo de gas combustible.

Después de depurar la información obtenida, se procede a realizar una revisión bibliográfica para elaborar una contextualización que permita evidenciar los avances de ingeniería que han tenido estos equipos de proceso.

A continuación, con base en la información depurada y la contextualización se plantearon posibles opciones de mejora para la eficiencia de los hornos basados en tres posibles causas de su disminución que son: el desgaste del aislamiento térmico y/o las paredes del equipo (pérdidas de calor con el ambiente); la temperatura y el flujo de la corriente de aire alimentada al sistema de combustión.

Figura 2.

Diagrama de flujo para el desarrollo del proyecto.



2.1 Recopilación de datos

La compañía suministró información con respecto a la composición del fluido de trabajo (varsol), composición y variables operacionales de transporte del gas combustible, comportamiento térmico de los hornos (termografías), parámetros de diseño de los equipos y datos operacionales monitoreados por el sistema SCADA.

En los apéndices se encuentra la información mencionada anteriormente; ésta sirvió como base para los análisis posteriores hechos a los hornos, además, se realizó una visita al sitio de operación de la planta con el fin de evidenciar el proceso.

2.1.1 Depuración de la información obtenida

Parte de la información suministrada por la empresa no tenía lugar en este estudio operacional, por lo tanto, dicha información fue filtrada para separar y seleccionar los datos involucrados directamente con el caso de estudio.

2.2 Contextualización bibliográfica

Con el fin de plantear posibles opciones de mejora, se llevó a cabo una contextualización bibliográfica que permitiera obtener información de valor con respecto a los avances ingenieriles hechos para sistemas de combustión similares y que, a su vez, pudiesen ser aplicados al caso de estudio teniendo en cuenta las características de los equipos en cuestión.

2.3 Aspectos que impactan la eficiencia

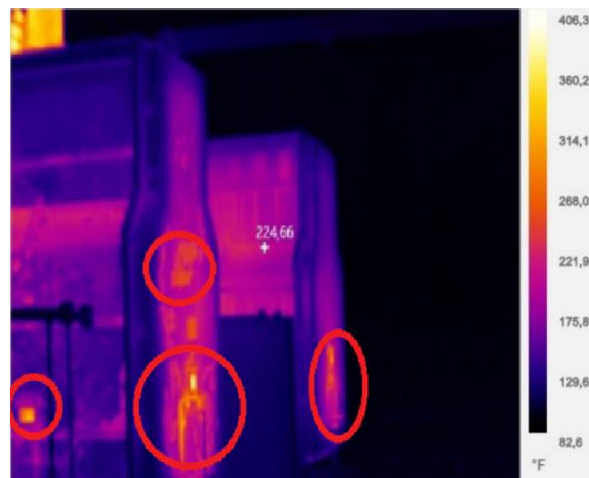
Se identificaron los siguientes aspectos que impactan la eficiencia de los hornos (lo que se traduce en mayor consumo de gas combustible):

2.3.1 Falla del aislamiento térmico y/o las paredes del equipo (pérdidas de calor con el ambiente)

Basados en la información suministrada, se identificó que el aislamiento térmico de los hornos presenta fallas; esto se ve reflejado en las pérdidas de calor de los equipos con el entorno. En la siguiente figura se localizaron zonas en las paredes de los hornos con temperaturas superiores al promedio registrado en las áreas monitoreadas lo que se conocen como “puntos calientes” lo cual es un indicador de la disipación de calor hacia el ambiente.

Figura 3.

Termografía lateral de los hornos.



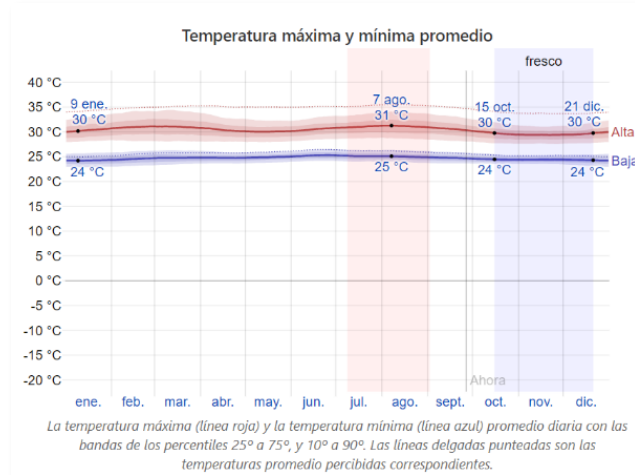
Nota: las termografías fueron proporcionadas por la planta de gas PG-PSC.

2.3.2 Baja temperatura de entrada de la corriente de aire alimentada al sistema

La temperatura de alimentación de la corriente de gas combustible se encuentra entre 299,817 y 305,372 Kelvin (entre 80 y 90 grados Fahrenheit) para el caso del aire la temperatura de entrada corresponde a la del sitio en el cual están ubicados los hornos (Sabana de Torres).

Figura 4.

Temperatura promedio de Sabana de Torres.



Nota: la imagen representa las temperaturas máxima y mínima promedio de Sabana de Torres.

Tomado de: («Clima promedio en Sabana de Torres, Colombia, durante todo el año», s. f.)

Sabana de Torres se encuentra en una zona de Santander con un clima cálido (superior a 23 grados Celsius) (Uriarte, 2020), las temperaturas a lo largo del año varían diariamente entre 297,15 y 304,15 Kelvin (75,2 y 87,8 grados Fahrenheit) («Clima promedio en Sabana de Torres, Colombia, durante todo el año», s. f.). Para fines académicos, se tomó una temperatura de entrada promedio de 300,65 Kelvin (81,5 grados Fahrenheit) con el fin de llevar a cabo los cálculos posteriores.

Basados en el artículo: (*Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance*, 2004) precalentar la corriente de aire aumenta notoriamente la eficiencia del proceso, además, es una tarea que no requiere un sistema complejo de equipos.

2.3.3 Cantidad excesiva o insuficiente de aire alimentada al sistema

Estequiométricamente existe una cantidad de oxígeno mínimo que debe ser alimentado al equipo para que la reacción de combustión se lleve a cabo en su totalidad. De dicho flujo depende que el combustible alimentado pueda ser aprovechado por completo. Sin embargo, una alimentación excesiva del mismo podría ocasionar pérdidas del calor generado por la combustión, puesto que dicho compuesto no se transformaría durante la reacción y finalmente parte del calor proveniente de la combustión tendría que ser utilizado para su calentamiento («III. QUIMICA DE LA COMBUSTION», s. f.)

Del mismo modo, si hay exceso de gas para la combustión se desperdiciaría calor; debido a que parte del combustible saldría del horno sin quemarse y sin aportar calor a la reacción. Además, si el aire y el combustible no se mezclan homogéneamente, podría generar hollín y/o humo negro (Siguenza, 1988).

2.4 Planteamiento de las alternativas de mejora

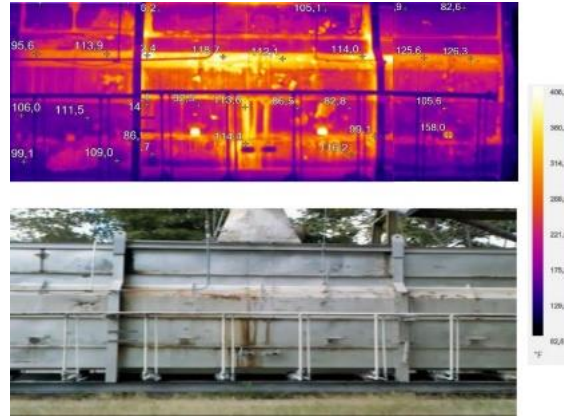
Basados en el numeral anterior se identificaron las posibles causas de la disminución de la eficiencia de los equipos y se plantearon las siguientes alternativas que permitirían mejorar su desempeño, dando como resultado un menor requerimiento de gas combustible para el mismo requerimiento energético del fluido de trabajo (varsol).

2.4.1 Sustituir o reparar parcial o totalmente el aislamiento térmico y/o las paredes de los hornos

Los hornos de llama directa que se encuentran en la planta de tratamiento de gas han operado a la intemperie desde 1965, es decir, durante más de cincuenta años han estado expuestos a los elementos de la naturaleza; dicha exposición pudo haber deteriorado y/o corroído parcialmente algunas zonas de sus paredes externas.

Figura 5.

Vista termográfica y natural del lado derecho del horno.

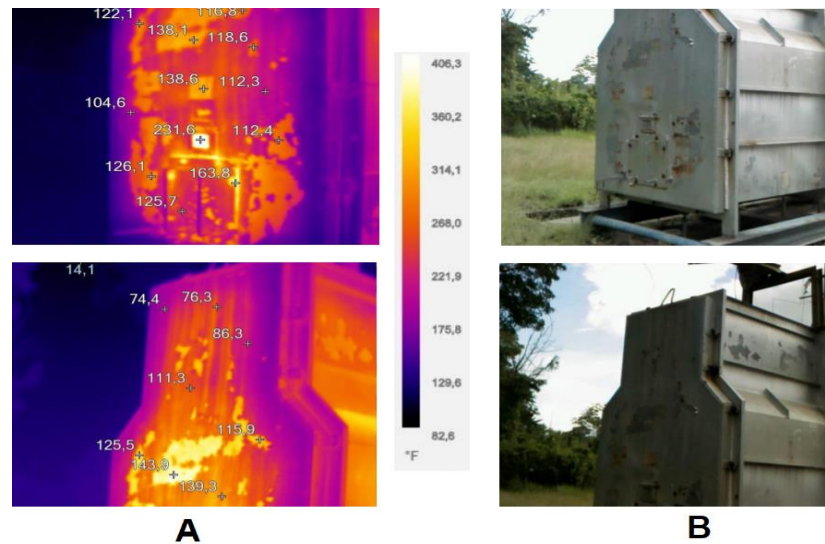


Nota: las termografías fueron proporcionadas por la planta de gas PG-PSC.

Con el fin de evidenciar el estado del aislamiento térmico en los hornos de calentamiento de llama directa, se realizaron estudios termográficos los cuales brindaron imágenes asociadas a las temperaturas presentes en las paredes externas de los equipos. En ausencia de fallas del aislamiento, la escala de temperaturas en las paredes de los equipos presentaría mínimas variaciones, es decir, una coloración semejante en toda la superficie. No obstante, el aislamiento térmico al interior de los equipos en estudio se ha deteriorado con el tiempo lo cual se evidenció por zonas en las cuales hay un aumento abrupto de temperaturas, como se observó en las imágenes termográficas.

Figura 6.

Vista termográfica (A) y natural del lado frontal del horno (B).



Nota: las termografías fueron proporcionadas por la planta de gas PG-PSC.

En la figura 5A se evidencia que efectivamente el aislamiento térmico de los equipos se encuentra deteriorado; como se observa, existen zonas en las que hay un cambio abrupto de coloración (temperatura). Adicionalmente, en las caras externas se constata que las zonas que han sido afectadas por el óxido presentan una mayor emisividad y por lo tanto, dichas áreas corroidas representan sitios de fuga de calor como resultado del deterioro (Morales, 2019).

Si se tiene como finalidad aumentar la eficiencia del equipo se debe tener en cuenta que parte del calor que se está produciendo por la reacción de combustión se está perdiendo con el entorno («*Gráficos y factores de pérdida de calor*», s. f.). Escoger el espesor y el material adecuado para aislar las paredes de los equipos no asegura que las pérdidas de calor con el entorno vayan a desaparecer, sin embargo, dichas pérdidas se pueden reducir entre el 10% y el 25%. Aclaremos, que a pesar de que los equipos se encuentren correctamente aislados, siempre existirán unas pérdidas aproximadas entre el 2% y el 5% del calor total del sistema («*Maximize system energy efficiency with proper insulation*», s. f.).

2.4.2 Precalentar la corriente de aire alimentada

El proceso de combustión genera cambios de temperatura lo cual hace que haya pérdidas de calor (parte del calor generado es utilizado para calentar los reactivos y/o los productos). Precalentar el aire de alimentación permite que la temperatura dentro del horno sea más uniforme permitiendo aprovechar en mayor proporción el calor generado lo cual conlleva a una combustión más eficiente («Calderas, generadores de vapor, hornos y secaderos en Eficiencia energética», 2012).

Existen varias alternativas para elevar la eficiencia de los hornos mediante la implementación de un sistema de calentamiento para el aire alimentado dentro de las cuales encontramos:

2.4.2.1 Recuperación directa de calor con los gases de chimenea. Los gases de chimenea salen a alta temperatura y se pueden poner en contacto con la corriente de aire alimentada, de esta manera la energía se transfiere a dicha corriente precalentándola antes de entrar al horno para así darle un uso más eficiente a los gases residuales.

También, es posible instalar regeneradores que son baterías de almacenamiento recargables para el calor (apéndice E). Entonces, los gases de chimenea fluyen a través del regenerador calentándolo, luego, el aire frío de alimentación ingresa y a medida que pasa extrae el calor aumentando su temperatura. Pero como hay que cargarlo para que absorba y almacene la energía térmica, es necesario el uso de dos regeneradores; mientras uno se carga el otro ya ha sido cargado y puede calentar la corriente de aire entrante («Install Waste Heat Recovery Systems for Fuel-Fired Furnaces», 2005).

Un recuperador es un intercambiador de calor de tubos o placas, estos son los equipos más usados debido a que se instala en la chimenea del horno funcionado en continuo, además, evita que las dos corrientes de gases se mezclen (apéndice F).

No todos los procesos son candidatos para la recuperación de calor residual; los volúmenes y las temperaturas de escape pueden ser demasiado bajos para proporcionar una justificación financiera; la temperatura de salida debe ser mayor a 810,93 Kelvin (1000°F) («Install Waste Heat Recovery Systems for Fuel-Fired Furnaces», 2005).

2.4.2.2 Instalación de un precalentador a la entrada de la corriente de aire. El proceso de precalentamiento también puede ser llevado de forma independiente instalando un calentador justo en la alimentación de aire. Generalmente, dichos equipos no tienen costos elevados y a su vez impactan positivamente al proceso.

Adicionalmente, aumentar la temperatura del aire que se va a involucrar en la combustión hace que la eficiencia aumente permitiendo aprovechar en mayor proporción el calor liberado de la misma (Garg, 1989).

A nivel industrial, los precalentadores de aire son intercambiadores de calor tubulares o calentadores con resistencias que son instalados al sistema con el único fin de elevar la temperatura del aire alimentado. En general, se utilizan intercambiadores de calor tubulares cuando existe una reacción de combustión (como en este caso) con el fin de aprovechar el calor que se encuentra en los gases de chimenea (Filipponi et al., 2016).

2.4.3 Ajustar el flujo de entrada de aire

Actualmente el equipo está tomando el aire necesario para la combustión directamente de la atmósfera. Gracias a los planos iniciales, se sabe que el equipo internamente trabaja con un 20% en exceso de aire con respecto al combustible alimentado.

La cantidad de aire presente dentro del equipo tiene un papel fundamental tanto en la reacción de combustión como en la eficiencia del horno puesto que el exceso o falta del mismo podría impactar negativamente la eficiencia del proceso en general.

En muchos hornos industriales es usado el oxígeno líquido para aumentar la concentración del mismo en el aire de alimentación. Otros, añaden otra entrada de oxígeno (apéndice G) de tal forma se incrementa el O₂ en el aire alimentado lo cual ayuda a aumentar la eficiencia del proceso, además, puede ayudar a disminuir las emisiones y mejorar la temperatura en el equipo.

3. Resultados

En el apéndice H, se encuentran las fracciones tanto molares como másicas y el nombre de cada uno de los compuestos que componen la corriente de gas combustible. Inicialmente, se comprobó si realmente se estaba perdiendo una cantidad considerable del calor liberado por la reacción para de esta forma establecer si debían hacerse modificaciones o no en los equipos que permitieran mejorar dicho problema.

Para esto, calculamos el calor liberado por la reacción teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Las temperaturas del gas combustible y del aire a la entrada son de 302,55 y 300,65 Kelvin (84,92 y 81,5 grados Fahrenheit) respectivamente.
2. La composición del gas combustible se encuentra en el apéndice H y la del aire se asumió como 79% nitrógeno y 21% oxígeno (composiciones molares).

3. La temperatura de los gases de chimenea es de 652,25 y 596,15 Kelvin (714,38 y 613,4 grados Fahrenheit) (apéndice I) respectivamente para cada horno. La temperatura promedio que se tomó para los cálculos fue de 624,2 Kelvin (663,89 grados Fahrenheit).
4. El exceso de aire para el equipo es del 20%; dicha condición fue extraída de los planos originales de los equipos.
5. El flujo de gas combustible en la entrada es de 460 kscfd (1 kscfd equivale a 1 pie cúbico estándar por día) (230 kscfd para cada horno respectivamente).
6. La presión de entrada del gas combustible y salida de los gases de chimenea es de 2,04 atm y 1 atm respectivamente.

El calor de la combustión fue calculado utilizando un camino termodinámico que involucra tres calores en su trayecto. Dos calores sensibles correspondientes al calor necesario para que los reactivos alcancen la temperatura estándar de las entalpías de formación y otro necesario para elevar la temperatura de los productos hasta el punto al que dichos gases salen del horno, por lo tanto, en el calor sensible ocurre una transferencia de calor en un sistema donde solo hay cambio de temperatura; no hay reacciones químicas ni cambios en la composición (Smith, Van Ness, & Abbott, 1997). El otro camino termodinámico es del calor de reacción que ocurre a temperatura estándar de formación (298,15 K). Los cálculos fueron realizados solo a uno de los hornos puesto a que al ser sistemas homólogos los resultados obtenidos para uno de ellos pueden ser utilizados para el otro también.

Se utilizó el simulador de procesos Aspen HYSYS[®] y, finalmente, el calor neto liberado por la reacción luego de calcular estos dos calores sensibles y el calor de reacción fue de: **-1,156e7 KJ/h** (-10,957 MMBtu/h) (apéndice J).

La finalidad de los hornos es calentar el flujo de varsol, por lo tanto, dicha corriente debería absorber el calor liberado por la reacción que ocurre dentro de cada equipo. A continuación, se calculó el calor absorbido por la corriente de varsol dentro de uno de los hornos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La temperatura de entrada y salida del varsol es de 474,8 y 524,8 Kelvin (395 y 485 grados Fahrenheit) respectivamente.
2. Se consideró que la distribución de la temperatura es homogénea a través de la parte más interna del equipo.
3. Se despreció el espesor del tubo que transporta el varsol.
4. La composición del varsol se encuentra en apéndice K y tiene un flujo es de 300 gpm que son distribuidos en los dos hornos (150 gpm para cada uno de ellos).
5. La presión de entrada y salida del varsol al sistema es de 11,57 atm y 9,53 atm respectivamente.

Para este caso, se utilizó Aspen HYSYS® con el fin de simular el proceso de intercambio de calor dentro del horno como un intercambiador de calor puesto que solo se buscaba conocer la cantidad de calor que es absorbida por la corriente. Teniendo en cuenta las características del sistema, el flujo de varsol y su composición, se halló que el calor absorbido por la corriente es de: **8,090e6 kJ/h** (7,662 MMBtu/h) (apéndice L).

Finalmente, se procedió a calcular la eficiencia térmica del equipo teniendo en cuenta los calores hallados anteriormente obteniendo el siguiente resultado:

$$\eta_{\text{Combustión}} = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{Q_{\text{neto liberado por la reacción}}} = \frac{8,090e6 \text{ kJ/h}}{1,156e7 \text{ kJ/h}} = 0,6998$$

La eficiencia obtenida es acorde a la esperada inicialmente. Los planos originales del equipo constatan una eficiencia del 78% (apéndice M) pero debido a su trayectoria operacional era de esperarse que ésta disminuyera a través del tiempo.

3.1 Análisis y selección de las alternativas propuestas

A continuación, basados en los resultados obtenidos se plantean las alternativas de mejora que podrían ser implementadas para aumentar la eficiencia de los hornos en estudio.

3.1.1 Sustituir o reparar parcial o totalmente el aislante térmico y/o las paredes de los hornos

Como se pudo evidenciar en estudios anteriores (termografías) parte del calor producido por la reacción de combustión se está disipando hacia el medio ambiente, es decir, las termografías demuestran que una parte del calor total generado está siendo intercambiado con la atmósfera como resultado de las fallas en el aislamiento térmico interno y la oxidación que presentan las paredes externas de los equipos («Usos, beneficios y aplicación de la Pintura Anticorrosiva», 2020).

Para aumentar la eficiencia mediante la disminución de las pérdidas de calor con el ambiente es recomendable una revisión del aislamiento térmico de los equipos que permita definir el estado actual de los mismos y a su vez llevar a cabo las reparaciones necesarias para que disminuyan los puntos calientes.

Para el caso del óxido externo (que ha aumentado la emisividad de las paredes) se recomienda recubrir las zonas más afectadas con pintura anticorrosiva; dichas mejoras disminuirían significativamente la emisividad de los puntos más críticos y a su vez conservaría la integridad del equipo aumentando su vida útil («Usos, beneficios y aplicación de la Pintura Anticorrosiva», 2020).

Llevar a cabo estos mantenimientos correctivos no garantiza que las pérdidas de calor con el ambiente sean despreciables. No obstante, investigaciones previas evidencian que las pérdidas de energía en forma de calor a través de las paredes pueden reducirse hasta en un 25%, lo que traduce en una mayor cantidad de energía disponible para ser transferida al flujo de trabajo («Maximize system energy efficiency with proper insulation», s. f.).

Para los hornos en estudio, el realizar estos mantenimientos correctivos podría teóricamente aumentar su eficiencia a **valores cercanos a su eficiencia original**, es decir, se obtendría un incremento desde 69,98% a un máximo de **78%**, lo que indica un incremento estimado promedio hasta el 74%.

Actualmente, el equipo está consumiendo 1,156e7 kJ/h (10,957 MMBtu/h) (con una eficiencia del 69,69%) si se implementa esta alternativa pasaría a consumir entre 1,093e7 kJ/h (10,362 MMBtu/h) y 1,037e7 kJ/h (9,831 MMBtu) (para eficiencias del 74% y 78% respectivamente); teniendo en cuenta que el valor comercial del MMBtu para el gas natural que se utiliza en la planta es de 5,2 USD y que existiría una reducción en el consumo de energía de entre 630,000 kJ/h (0,595 MMBtu/h) hasta 1.190.000 kJ/h (1,126 MMBtu/h); **se esperaría un ahorro de entre 27.103,44 USD y 51.309,07 USD por año.**

No se tuvo en cuenta el costo de las intervenciones necesarias para la reparación total o parcial del aislamiento térmico de los hornos, además, se deberán realizar estudios adicionales con el fin de definir su estado actual y el tiempo de recuperación de la inversión.

3.1.2 Precalear la corriente de aire alimentada

Instalar facilidades que permitan precalentar la corriente de aire alimentada al sistema aumentarían significativamente la eficiencia del proceso en general (apéndice Ñ); según (Garg, 1989) esta modificación a los hornos de combustión permitiría elevar su eficiencia entre el 9% y

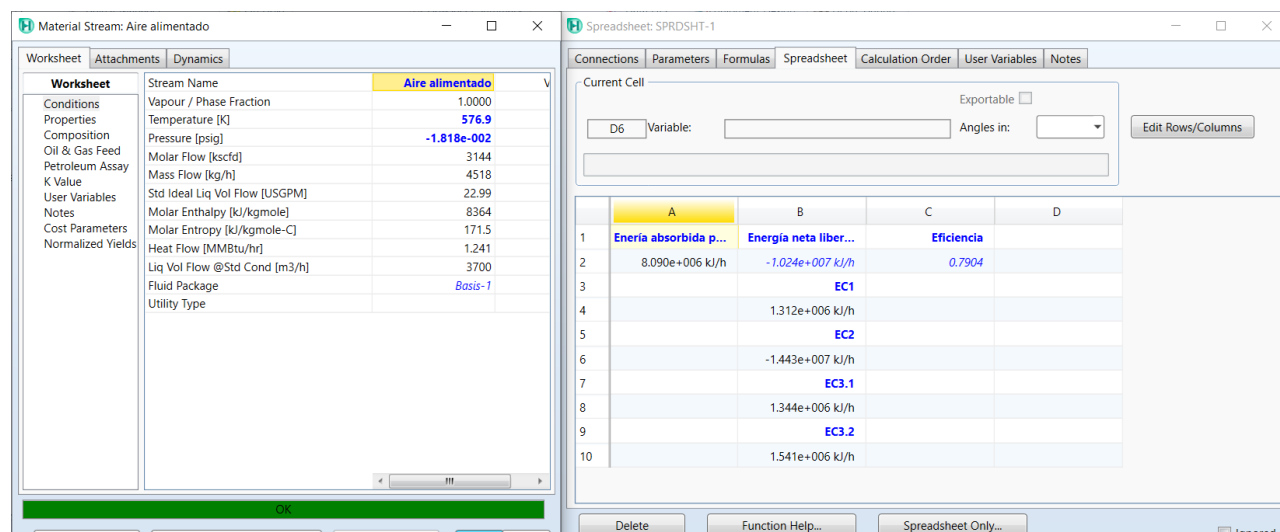
12% para aumentos de temperatura de entre 200 y 250 Kelvin en relación a la temperatura actual de entrada del aire.

Adicionalmente, el intercambiador necesario para precalentar el aire es un equipo que puede ser costeado teniendo en cuenta el ahorro proporcionado por la alternativa, es decir, tendría una relación costo beneficio favorable por la cantidad de gas natural que se podría ahorrar con su implementación («Install Waste Heat Recovery Systems for Fuel-Fired Furnaces», 2005).

La eficiencia actual del horno es aproximadamente del 69,98%, si se implementa esta alternativa con base en el estado de los hornos, su desgaste y trayectoria operacional (más de 50 años de operación) se esperaría un aumento de entre 9% y 12% es decir, su eficiencia podría aumentar entre el 79,04% y 81,98% como se observa en las siguientes figuras:

Figura 7.

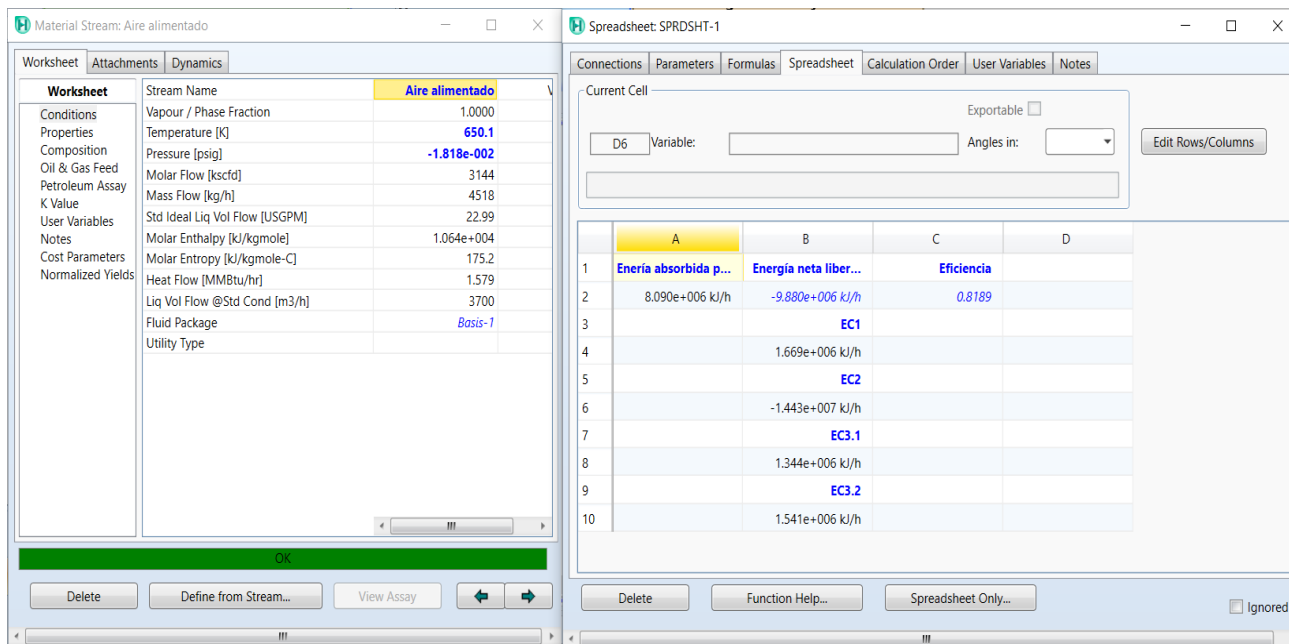
Aumento de la eficiencia con un cambio aproximado de la temperatura de entrada del aire de 200 Kelvin.



Nota: la imagen muestra el cálculo de la eficiencia del proceso de transferencia de calor al aumentar la temperatura de entrada del aire en 200 Kelvin obteniendo una eficiencia final del 79,04%.

Figura 8.

Aumento de la eficiencia con un cambio aproximado de la temperatura de entrada del aire de 250 Kelvin.



Nota: la imagen muestra el cálculo de la eficiencia del proceso de transferencia de calor al aumentar la temperatura de entrada del aire en 250 Kelvin obteniendo una eficiencia final del 81,89%.

Actualmente, el equipo está consumiendo 1,156e7 kJ/h (10,957 MMBtu/h) si se implementa esta alternativa pasaría a consumir entre 1,024e7 kJ/h (9,709 MMBtu/h) y 9,867e6kJ/h (9,353 MMBtu/h) (para eficiencias de 78,98% y 81,98% respectivamente); teniendo en cuenta que el valor comercial del MMBtu para el gas natural que se utiliza en la planta es de 5,2 USD y que existiría una reducción en el consumo de energía de entre 1.320.000 kJ/h (1,248 MMBtu/h) hasta

1.693.000 kJ/h (1,604 MMBtu/h); se esperaría un ahorro de entre 56.856,52 USD y 73.049,23 USD por año.

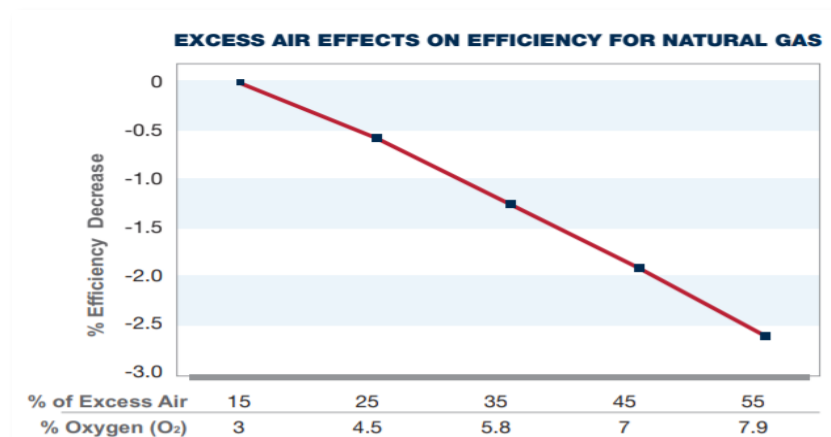
Adicionalmente, se recomienda utilizar un regenerador para llevar a cabo dicho proceso puesto a que este permite aprovechar el calor de los gases de chimenea y funciona en continuo. Para analizar su costo de instalación, transporte e implementación se sugiere llevar a cabo un estudio técnico para definir dichos costos.

3.1.3 Modificar la cantidad de aire alimentado

En la actualidad el flujo de aire es de 3.144 kscfd que corresponde al 20% de aire en exceso. Según los análisis hechos por la empresa estadounidense (CleverBrooks, s. f.), el exceso de aire debe ser menor al 15% con el fin de que la eficiencia no disminuya y que a su vez superior al 3% para que el requerimiento estequiométrico de oxígeno se cumpla.

Figura 9.

Relación entre la eficiencia y el exceso de aire para el gas natural.



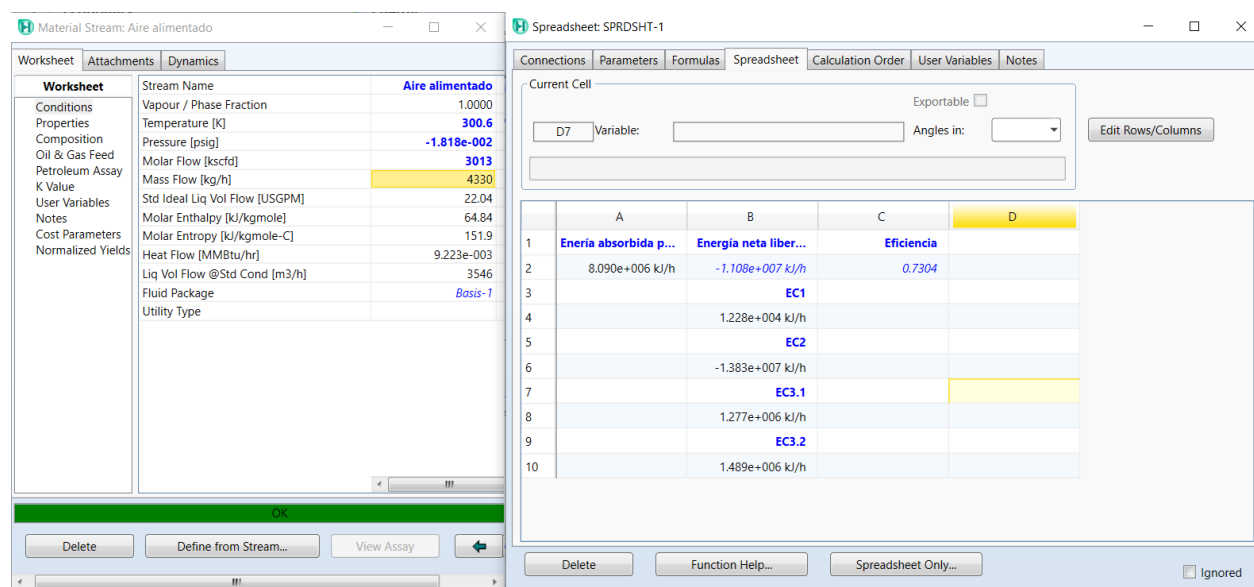
Nota: la gráfica representa el comportamiento de la eficiencia térmica del proceso ante cambios en el exceso de aire alimentado al sistema. Tomado de (CleverBrooks, s. f.)

Teniendo en cuenta la evidencia de la investigación anterior, la cantidad de gas combustible alimentada al sistema, su composición y cada una de las reacciones que se llevan a cabo para los componentes del combustible, se recomienda entonces una alimentación de entre 2.698,6 kscfd y 3.013 kscfd (3% y 15% de aire en exceso respectivamente) si se mantiene la cantidad de combustible alimentada (460 kscfd para los dos hornos; 230 kscfd para cada uno de ellos).

Para llevar a cabo dicha tarea los tubos Venturi presentes en las entradas por las cuales fluye el aire hacia el interior de los equipos deberán ser calibrados con la finalidad que la cantidad alimentada de aire garantice el requerimiento de oxígeno estequiométrico de la reacción y a su vez haya un exceso de entre el 3% y 15% (CleverBrooks, s. f.); a continuación presentamos las figuras en las que se recalcula la eficiencia del proceso al llevar a cabo las modificaciones mencionadas anteriormente.

Figura 10.

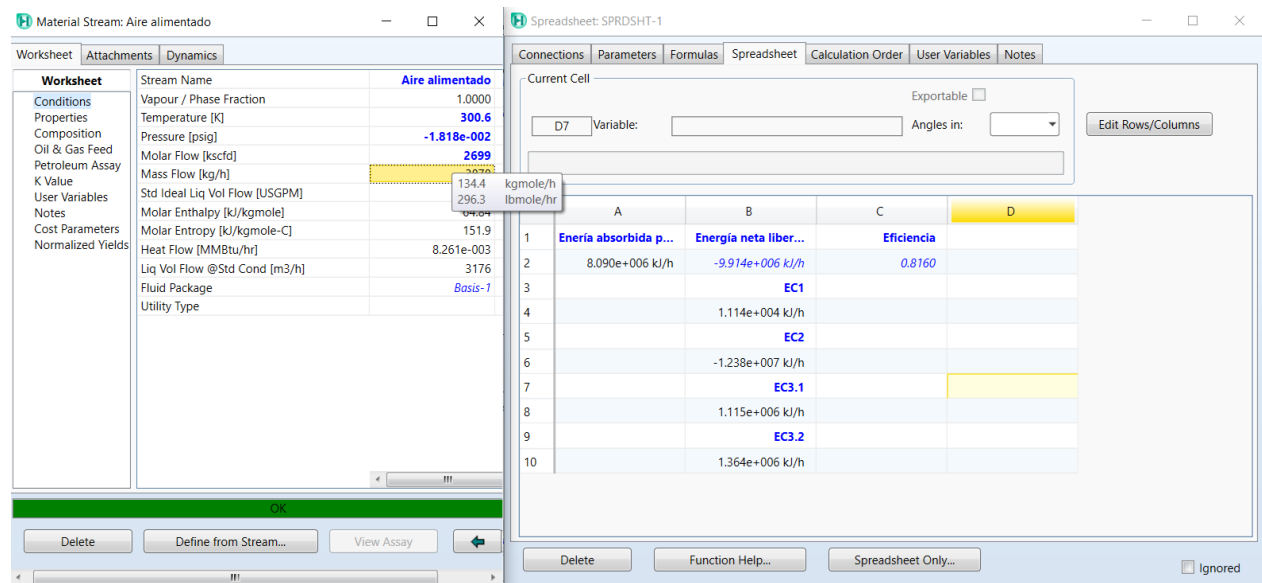
Eficiencia calculada con la modificación del flujo de aire (15% de exceso).



Nota: la figura muestra la eficiencia que alcanzaría el proceso si se modificara su alimentación de aire a 3.013 kscfd (15% en exceso) esperando una eficiencia final del 76,04%.

Figura 11.

Eficiencia calculada con la modificación del flujo de aire (3% de exceso).



Nota: la figura muestra la eficiencia que alcanzaría el proceso si se modificara su alimentación de aire a 2.699 kscfd (3% en exceso) esperando una eficiencia final del 81,60%.

Actualmente, la eficiencia del equipo es del 69,98% y está consumiendo 1,156e7 kJ/h (10,957 MMBtu/h) si se implementa esta alternativa la eficiencia aumentaría entre 3,06% y 11,62% (estos valores para excesos del 15% (figura 10) y 3% (figura 11) respectivamente), por lo tanto, para suplir el requerimiento actual de calor, pasaría a consumir entre 1,107e7kJ/h (10,498 MMBtu/h) y 9,914e6 kJ/h (9,397 MMBtu/h) (para eficiencias de 73,04% y 81,60% respectivamente); teniendo en cuenta que el valor comercial del MMBtu para el gas natural que se utiliza en la planta es de 5,2 USD y que existiría una reducción en el consumo de energía de entre

490.000 kJ/h (0,456 MMBtu/h) hasta 1.646.000 kJ/h (1,56 MMBtu/h); **se esperaría un ahorro de entre 20.899,59 USD y 71.064,14 USD por año**

4. Conclusiones

El estudio conceptual de los hornos de llama permitió demostrar que es posible aumentar la eficiencia del proceso en general en términos de ahorro gas combustible si se realizan modificaciones al proceso haciéndolo así mucho más rentable y eficiente.

Si se adecua el proceso con alguna de las alternativas de ahorro planteadas anteriormente, se podría esperar un ahorro mínimo de 20.899,56 USD por año y máximo 76.049,23 USD por año.

Teniendo en cuenta las alternativas planteadas, la adecuación que requeriría menor intervención para el proceso sería la tercera (modificar la cantidad de aire alimentado al sistema) puesto a que su implementación solo requiere calibrar los tubos Venturi permitiendo una entrada de entre el 3% y el 15% (2.698 kscfd y 3.013 kscfd) de aire en exceso con respecto al gas natural alimentado.

Basados en los beneficios evidenciados al implementar las alternativas propuestas, precalentar el aire de entrada al sistema proporcionaría un mayor aumento en la eficiencia térmica del proceso traducido en un menor requerimiento de gas combustible (disminuyendo su consumo en un máximo de 17,13%) en comparación con las demás alternativas planteadas.

Referencias bibliográficas

- Calderas, generadores de vapor, hornos y secaderos en Eficiencia energética. (2012). Recuperado 10 de diciembre de 2020, de https://www.eoi.es/wiki/index.php/Calderas,_generadores_de_vapor,_hornos_y_secaderos_en_Eficiencia_energética
- CleaverBrooks. (s. f.). THE IMPACT OF EXCESSAIR ON EFFICIENCY. Recuperado 29 de noviembre de 2020, de <https://watmfg.com/watmfg23082016/wp-content/uploads/2016/09/Excess-Air-and-Boiler-Efficiency.pdf>
- Clima promedio en Sabana de Torres, Colombia, durante todo el año. (s. f.). Recuperado 29 de noviembre de 2020, de <https://es.weatherspark.com/y/24388/Clima-promedio-en-Sabana-de-Torres-Colombia-durante-todo-el-año>
- Filipponi, M., Rossi, F., Presciutti, A., De Ciantis, S., Castellani, B., & Carpinelli, A. (2016). Thermal Analysis of an Industrial Furnace. *Energies*, 13. <https://doi.org/10.3390>
- Garg, A. (1989). How to boost the performance of Fired Heaters. Recuperado 22 de noviembre de 2020, de https://www.researchgate.net/publication/259648414_How_to_boost_the_performance_of_Fired_Heaters
- Gráficos y factores de pérdida de calor. (s. f.). Recuperado 9 de enero de 2021, de <https://es.watlow.com/en/resources-and-support/engineering-tools/reference-data/heat-loss-factors-and-graphs>
- III. QUIMICA DE LA COMBUSTION. (s. f.). Recuperado 15 de enero de 2021, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4324/Capitulo3.pdf>

Install Waste Heat Recovery Systems for Fuel-Fired Furnaces. (2005). Recuperado 20 de noviembre de 2020, de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/install_waste_heat_process_htgts8.pdf

Maximize system energy efficiency with proper insulation. (s. f.). Recuperado 10 de diciembre de 2020, de <https://www.reliableplant.com/Read/15871/maximize-system-energy-efficiency-with-proper-insulation>

Morales, A. (2019). *REPORTE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA*.

Oxygen-Enriched Combustion. (2005). Washington. Recuperado de www.eere.energy.gov/industry/bestpractices.

Siguenza, G. (1988). COMO CALCULAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTION POR MEDIO DE LOS GASES DE COMBUSTION. Recuperado 9 de enero de 2021, de <http://www.industrialtijuana.com/pdf/C-2.pdf>

Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (1997). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Recuperado 7 de diciembre de 2020, de <https://solleon4555.files.wordpress.com/2014/08/introduccion-a-la-termodinamica-en-ingenieria-quimica-5a-ed.pdf>

The Importance of Using High Temperature Insulation Materials in Furnaces. (s. f.). Recuperado 20 de noviembre de 2020, de <https://thermcraftinc.com/importance-using-high-temperature-insulation-materials-furnaces/>

Uriarte, J. M. (2020, noviembre 23). *Clima Cálido*. Recuperado 13 de enero de 2021, de <https://www.caracteristicas.co/clima-calido/>

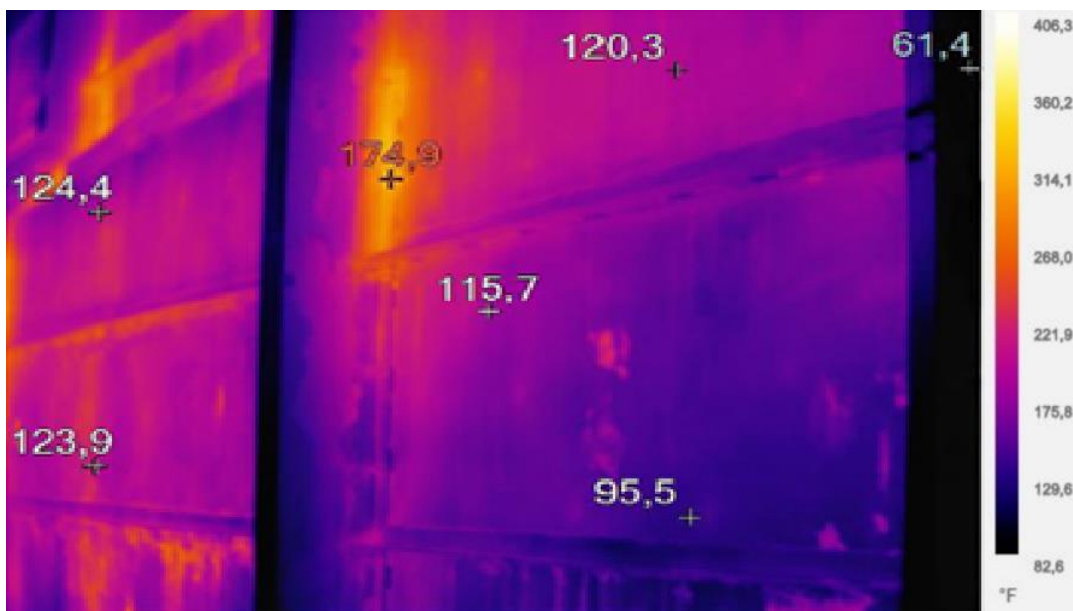
Usos, beneficios y aplicación de la Pintura Anticorrosiva. (2020). Recuperado 10 de diciembre de 2020, de <https://www.pinturassuper.com/beneficios-aplicacion-pintura-anticorrosiva/>

Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance. (2004). Washington, DC. Recuperado de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/35876.pdf>

Apéndices



Apéndice A. Termografía lateral de los dos hornos.



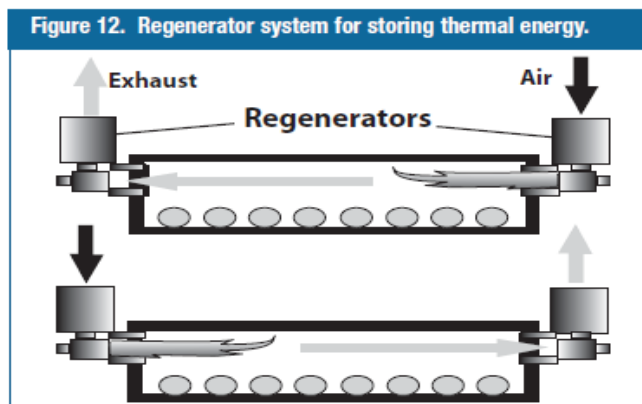
Apéndice B. Termografía del costado izquierdo del horno.



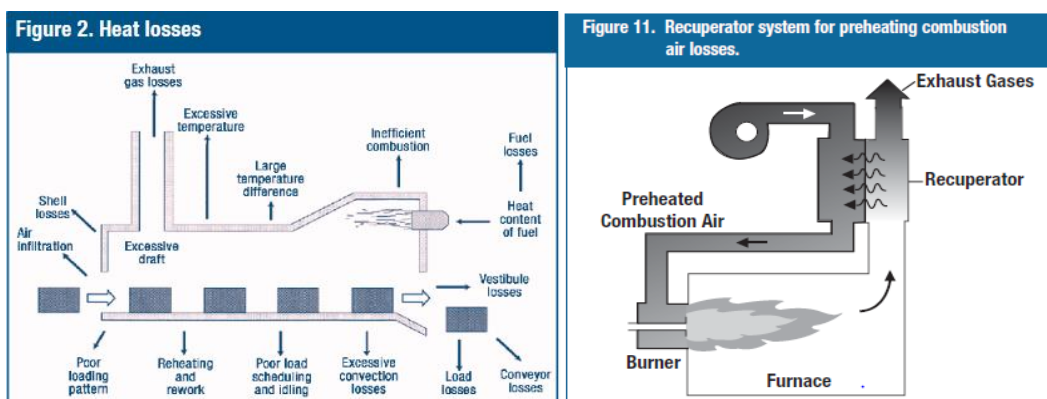
Apéndice C. Termografía de la chimenea del horno.



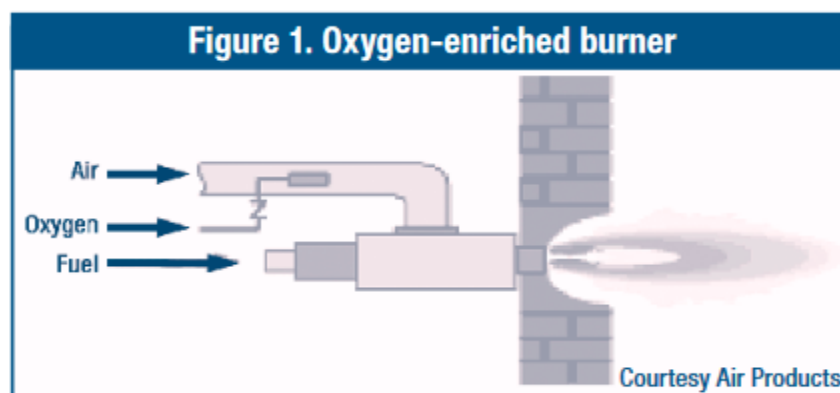
Apéndice D. Termografía frontal del horno.



Apéndice E. Regenerador de calor. *Tomado de:* (Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance, 2004).



Apéndice F. Recuperador de calor. *Tomado de:* («Install Waste Heat Recovery Systems for Fuel-Fired Furnaces», 2005)(Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emissions Performance, 2004).



Apéndice G. Aumento de oxígeno en la alimentación. *Tomado de:* (Oxygen-Enriched Combustion, 2005).

Compositional Analysis of Gas combustible planta - Separador gas combustible to C		
Sampling Date	02 - Diciembre - 2019	
Sampling Location	Gas combustible planta	
Cylinder Number	-	
Sample Description	Separador gas combustible	
Sampling Conditions	80.0 psig @ 95.0°F	
Component	Mole %	Weight %
CO ₂ Carbon Dioxide	7.52	11.62
N ₂ Nitrogen	0.39	0.39
C ₁ Methane	47.70	26.88
C ₂ Ethane	20.55	21.72
C ₃ Propane	20.49	31.74
IC ₄ i-Butane	0.82	1.68
nC ₄ n-Butane	1.43	2.91
C ₅ Neo-Pentane	0.02	0.06
IC ₅ i-Pentane	0.39	0.98
nC ₅ n-Pentane	0.34	0.86
C ₆ Hexanes	0.23	0.67
M-C-Pentane	0.03	0.09
Benzene	0.01	0.02
Cyclohexane	0.02	0.07
C ₇ Heptanes	0.03	0.15
M-C-Hexane	0.01	0.05
Toluene	0.00	0.02
C ₈ Octanes	0.01	0.05
E-Benzene	0.00	0.00
M/P-Xylene	0.00	0.00
O-Xylene	0.00	0.00
C ₉ Nonanes	0.01	0.04
C ₁₀ Decanes	0.00	0.00
C ₁₁ Undecanes	0.00	0.00
C ₁₂₊ Dodecanes Plus	0.00	0.00
Totals :	100.00	100.00
Note: 0.00 means less than 0.005.		
Calculated Residue Properties:	Mole Weight (g mol ⁻¹)	Density (g cm ⁻³ at 60°F)
C ₇₊ Heptanes plus	95.4	0.7488
C ₁₀₊ Decanes plus	-	-
C ₁₂₊ Dodecanes plus	-	-
Calculated Whole Gas Properties		
Gas Gravity	0.9825	(Air=1 @ 14.73 psia & 60°F)
Whole Sample Mole Weight	28.460	g mol ⁻¹
Ideal Gas Density	1.1974	kg m ⁻³ @ 14.65psia, 60°F
Ideal Gross Calorific Value	1477.4	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Ideal Net Calorific Value	1348.2	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Pseudo Critical Press.	689.20	psia
Pseudo Critical Temp.	481.60	Rankine
Gas Compressibility Factor, Z	0.993722	@ 14.65 psia & 60°F
GPM (80% Propane)	5.6258	Gal/1000 PC
GPM (100% Propane)	6.7480	Gal/1000 PC
Additional Information		
Real Gross Calorific Value	1486.7	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Real Net Calorific Value	1356.7	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F

Apéndice H. Tabla de composiciones molares y máscas de los gases de combustión y algunas de sus propiedades.



Apéndice I. Temperaturas de los gases de chimenea.

Spreadsheet: SPRDSHT-1

Connections Parameters Formulas Spreadsheet Calculation Order User Variables Notes

-Current Cell
 Variable Type: **Energy** Exportable
 B2 Variable: Angles in: **Rad**
 =-B4+B6+B8+B10

	A	B	C	D
1	Enería absorbida p...	Energía neta liber...	Eficiencia	
2	8.090e+006 kJ/h	-1.156e+007 kJ/h	0.6998	
3		EC1		
4		1.275e+004 kJ/h		
5		EC2		
6		-1.443e+007 kJ/h		
7		EC3.1		
8		1.344e+006 kJ/h		
9		EC3.2		
10		1.541e+006 kJ/h		

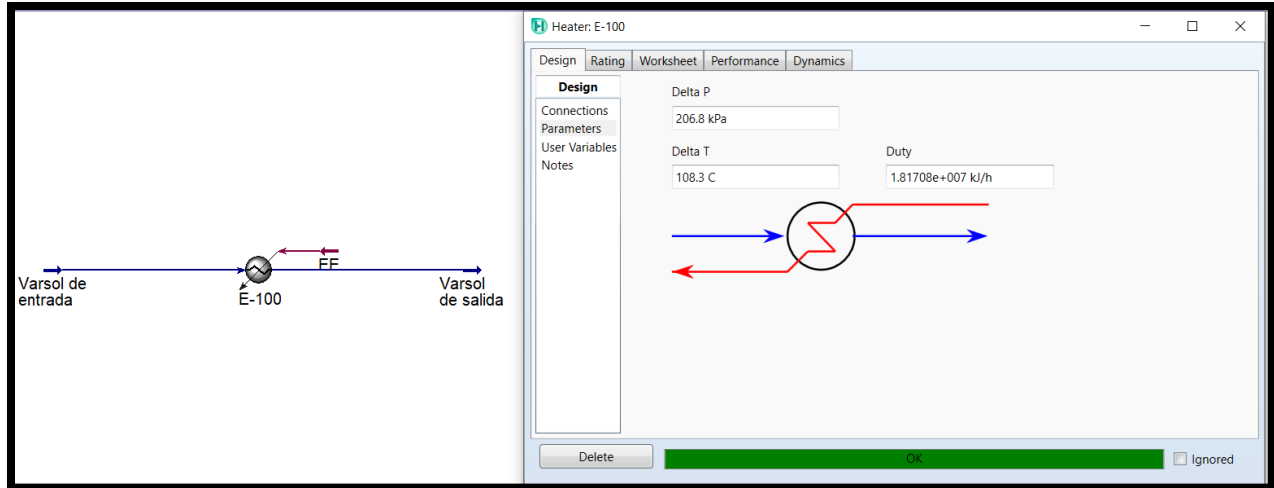
Delete Function Help... Spreadsheet Only... Ignored

Apéndice J. Cálculo de los calores involucrados en el horno y su eficiencia.

Composición del varsol

Temperatura de entrada (Kelvin)	422.039		
Temperatura de salida (Kelvin)	530.35		
Componente	%Molar	%Másico	Fracción molar
Propano	0.01	0	0.0001
I-Butano	0.01	0	0.0001
N-Butano	0.01	0	0.0001
I-Pentano	0.02	0.01	0.0002
N-Pentano	0.01	0.01	0.0001
Hexano	1.24	0.9	0.0124
Benceno	0.04	0.03	0.0004
Ciclohexano	1.33	0.96	0.0133
Heptano	24.1	21.35	0.241
Tolueno	2.32	1.83	0.0232
Octano	30.8	30.15	0.308
E-Benceno	3.72	3.38	0.0372
M/P-Xylene	2.33	2.12	0.0233
O-Xylene	3.04	2.76	0.0304
Nonano	14.54	15.98	0.1454
Decano	10.47	12.54	0.1047
Undecano	3.86	4.86	0.0386
Dodecano	1.32	1.82	0.0132
Traidecano	0.51	0.77	0.0051
Tetradecano	0.22	0.35	0.0022
Pentadecano	0.1	0.18	0.001
Sumatoria	100	100	1

Apéndice K. Tabla con la composición del varsol. Datos tomados de la simulación en Aspen HYSYS®.



Apéndice L. Simulación del intercambio de calor del varsol.

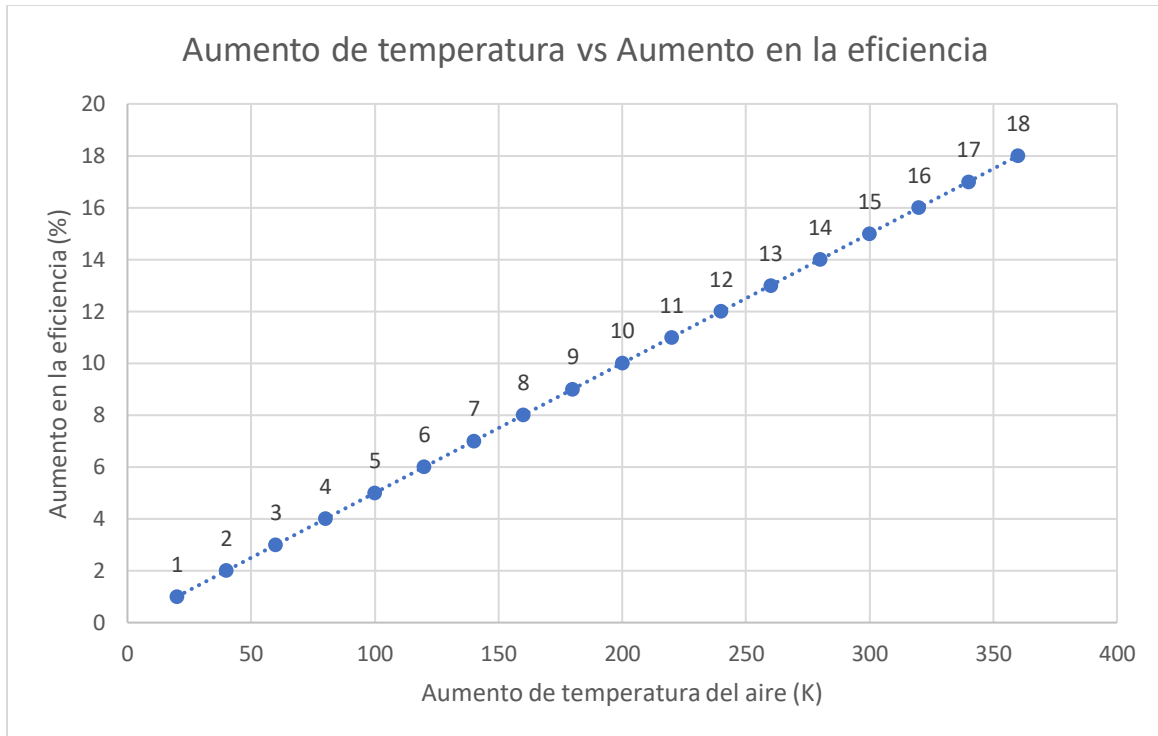
wheco WASTE HEAT ENGINEERING CORP.
 P. O. BOX 1653 HOUSTON, TEXAS 77001

DIRECT FIRED HEATER SPECIFICATION SHEET

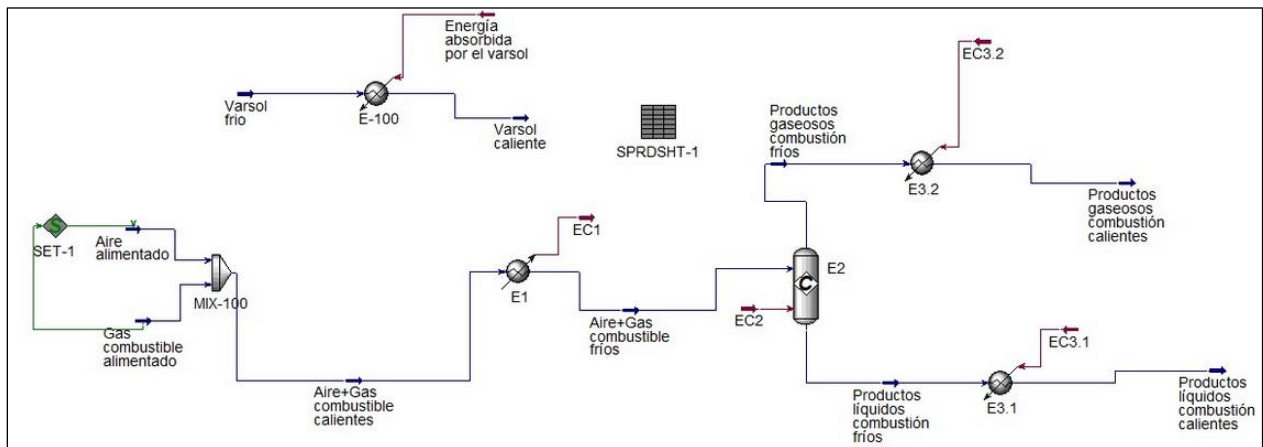
Customer: Hudson Engineering Corp. Date: 11-27-84
 Project: Citrus Service Oil Company Customer Ref: Jab 59x5
Rayco plant Proposal No: 611-84
 Reference Dwg: 4H2-24-B-V2
 Service: Still Reboiler Item No: TWO Required

		PERFORMANCE	
1			
2	Type Charge	<u>Lean Oil (300°F-400°F)</u>	Charge Rate <u>195 gpm</u>
3	Flow Passes	<u>Single</u>	Pressure Drop <u>30 psi</u>
4	Excess Air	<u>20%</u>	Setting Loss <u>2 1/2%</u>
5	Efficiency (LHV)	<u>78%</u>	Type Fuel <u>Nat. Gas @ 20 psig</u> <u>1150 BTU/SCF</u>
6	Stack Temperature	<u>175°F</u>	Bridgwall Temperature <u>1495°F</u>
7	Duty MMBTU/Hr.	<u>10,800</u>	Release MMBTU/Hr. (LHV) <u>13.85</u>
8	Flow Conditions	Inlet	Outlet
9	Liquid, Lbs./Hr.	<u>76,920</u> ✓	<u>30,720</u>
	Vapor, Lbs./Hr.	<u>--</u>	<u>46,200</u>
11	Liquid Sp. Gr. @ 60°F.	<u>0.7883</u>	
12	Liquid Mol. Wt.		
13	Liquid Viscosity		
14	Vapor Mol. Wt.		<u>140</u>
15	Temperature, °F.	<u>470</u>	<u>575</u>
16	Pressure, PSIG	<u>170</u>	<u>140</u>
17			
18			

Apéndice M. Especificaciones del diseño del horno de llama directa.



Apéndice N. Relación entre el aumento de la temperatura de alimentación de aire y el aumento de la eficiencia. Tomado de: (Garg, 1989).



Apéndice O. Simulación del proceso completo, respecto al intercambio de calor del horno.

Componente	Entalpías estándar (KJ/Kmol)
Metano	-74520
Etano	-83820
Propano	-104680
n-Butano	-125790
n-Pentano	-146760
Hexano	-166920
Benceno	82930
Ciclohexano	-123140
Heptano	-187780
Tolueno	50170
Octano	-208750
Agua	-241818
Dióxido de carbono	-393509

Apéndice P. Entalpías estándar de formación de los compuestos del combustible a 298,15 K. Datos tomados de: (Smith et al., 1997).

$$C_p/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}; T(\text{Kelvin}) \text{ de } 298 \text{ a } T_{\text{máx}}$$

Compuestos	A	B	C	D
Metano	1,702	9,081	-2,164	
Etano	1,131	19,225	-5,561	
Propano	1,213	28,785	-8,824	
N-butano	1,935	36,915	-11,402	
N-pentano	2,464	45,351	-14,111	
Hexano	3,025	53,722	-16,791	
Benceno	-0,206	39,064	-13,301	
Ciclohexano	-3,876	63,249	-20,928	
Heptano	3,570	62,127	-19,486	
Tolueno	0,209	47,052	-15,716	
Octano	8,163	70,567	-22,208	
Oxígeno	3,693	0,506		-0,227
Nitrógeno	3,280	0,593		0,040
Dióxido de carbono	5,457	1,045		-1,157
Agua	3,470	1,450		0,121

Apéndice Q. Capacidades caloríficas de gases en estado de gas ideal, de los compuestos del combustible. Datos tomados de: (Smith et al., 1997).

Q _{rxn} (MMBtu/h)	Q _{reactivos} (MMBtu/h)	Q _{productos} (MMBtu/h)
-1,37E+01	1,21E-02	2,734

Apéndice R. Calores de la combustión. Datos tomados de la simulación en Aspen HYSYS®.

The image shows two overlapping windows from a software application. The left window, titled 'SET-1', has a 'Parameters' tab selected. It displays a 'Multiplier' field with the value '13.718' and an 'Offset [kscfd]' field with the value '0.00000 kscfd'. Below these fields, the equation $Y = (13.718) * X + (0) \text{ [kscfd]}$ is shown. The right window, titled 'Material Stream: Aire alimentado', has a 'Worksheet' tab selected. It displays a table of properties for the material stream.

Worksheet	Stream Name	Aire alimentado
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1.0000
Properties	Temperature [K]	300.6
Composition	Pressure [psig]	-1.818e-002
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kscfd]	3144
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	4518
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [USGPM]	22.99
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	64.84
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	151.9
Cost Parameters	Heat Flow [MMBtu/hr]	9.624e-003
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3700
	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

Apéndice S. Cálculo del aire absorbido por el horno (20% en exceso).