

APLICACIÓN DE PROGRAMA DE COMPUTACIÓN PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE HORNOS DE PROCESOS, SEGMENTO A SEGMENTO DE TUBERÍA, CON BASE EN UN CASO REAL DE CALENTAMIENTO DE CRUDO PARA DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA.

APPLICATION OF COMPUTING PROGRAM FOR EVALUATING PROCESS FURNACES PERFORMANCE, SEGMENT BY SEGMENT OF PIPELINE, BASED ON A REAL CASE OF CRUDE OIL HEATING SERVICE TO ATMOSPHERIC DISTILLATION.

J. C. PERFETTI HOLZHÄUSER¹

jperfetti@unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas (Venezuela)

Resumen

Los hornos de procesos son unidades operativas críticas de las instalaciones petroleras y químicas en general, cuyo servicio es proveer calor de combustión a corrientes de proceso. La evaluación del desempeño de estos equipos, a partir de datos reales, es una actividad imprescindible para el diagnóstico y mejora operacional de los mismos. La metodología estándar de evaluación consiste en implementar recursos como la norma API 560, para evaluar a partir de datos del lado del fuego la absorción de calor y la eficiencia térmica. El programa de computación desarrollado sirve para evaluar el desempeño del horno segmento a segmento de serpentín de tubos, a partir de esos mismos datos y, datos de la carga y del equipo. Es un desarrollo propio codificado en Fortran 95. Se presenta un esquema del programa aplicado a servicio de calentamiento de crudo para destilación atmosférica, ecuaciones principales, y evaluación de un horno real. La comparación del programa con data real arrojó desviaciones del orden de 1% para la temperatura de gases de combustión en el arco radiante, calor absorbido y eficiencia térmica, y del 4% para la temperatura de salida del crudo. La evaluación

¹ Ingeniero Químico formado en INTEVEP, orientado al servicio de la industria Petrolera y Química, en actividades de Asistencia Técnica y Adiestramiento. Es asesor en combustión y transferencia de calor, con competencias para dar cursos y realizar actividades de auditoría, evaluación, simulación, entonación de hornos y calderas. Es Director en la firma consultora Meproca. Desde 2018 incorpora la actividad docente.



del banco convectivo mostró una reducción del 50% respecto a diseño en eficiencias de aleta, lo cual plantea como posible explicación el daño de superficie extendida o superficie menor que la especificada en diseño. El programa muestra potencial para evaluar el diseño de la sección de radiación de hornos de procesos, con base en la comparación de la temperatura en el arco radiante.

Palabras claves: Hornos de procesos; evaluación de desempeño; programa de computación; eficiencia térmica; norma API 560.

Abstract

Process furnaces are critical operating units of petroleum and chemical facilities in general, whose service is to provide heat of combustion to process streams. The performance evaluation of these units, based on real data, is an essential activity for the diagnosis and operational improvement of them. The standard evaluation methodology consists of implementing resources such as the API Standard 560, to evaluate heat absorption and thermal efficiency from fire side data. The computing program developed is used to evaluate the performance of the furnace, segment by segment of pipe, based on the same data as standard evaluation, and data from the feed load and equipment. It is a proprietary development encoded in Fortran 95. A scheme of the program applied to crude oil heating to atmospheric distillation, main equations, and performance evaluation of a real furnace is presented. The comparison of the program with real data yielded deviations of the order of 1% for the temperature of the combustion gases in the radiant arc, absorbed heat and thermal efficiency, and 4% for the crude oil outlet temperature. The evaluation of the convective bank showed a 50% reduction with respect to the design in fin efficiencies, which raises as a possible explanation the damage of extended surfaces or surface smaller than that specified in the design. The program shows potential to evaluate the design of the radiation section of process furnaces, based on the temperature of combustion gases in the radiant arc.

Key words: Process furnaces; performance evaluation; computing program; thermal efficiency; API Standard 560.

RECIBIDO: 09-03-2021 / ACEPTADO: 11-05-2021 / PUBLICADO: 15-12-2021

Cómo citar: Perfetti Holzhäuser J. C. (2021). Aplicación de programa de computación para evaluar el desempeño de hornos de procesos, segmento a segmento de tubería, con base en un caso real de calentamiento de crudo para destilación atmosférica. *Anales*, 37, 33-54.
<https://doi.org/10.58479/acbfm.2021.71>

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Resumen | 33 |
| Abstract | 34 |
| Introducción | 37 |
| Horno de procesos | 37 |
| Evaluación estándar del desempeño térmico de hornos | 40 |
| Programa de computación para evaluar hornos segmento a segmento de serpentín | 42 |
| Resultados | 47 |
| Discusión de resultados | 51 |
| Conclusiones | 52 |
| Referencias | 53 |

Introducción

Los hornos que se utilizan en la industria petrolera y petroquímica, son equipos críticos de combustión empleados para el tratamiento térmico de corrientes de proceso. La combustión ocurre al hacer reaccionar combustible gaseoso y/o líquido con el Oxígeno del aire, produciendo llama y calor.

Se emplean hornos de dos tipos. Los hornos de procesos, los cuales proveen calor para calentar corrientes que son procesadas en equipos aguas abajo. Los hornos de pirolisis, que proveen calor para que una reacción química se lleve a cabo dentro de los tubos del horno.

La operación de estos equipos debe realizarse mediante estrictos controles y personal entrenado, de manera de proporcionar un servicio óptimo a la carga, en términos de capacidad, uso del combustible, cuidado del personal, del equipo y del medio ambiente.

Las refinerías de petróleo modernas deben disponer de sistemas de instrumentación y controles para el seguimiento, operación, control y protección de estos equipos de combustión. Estos sistemas varían en su alcance en función de los recursos disponibles. Por un lado están las instalaciones con elevados recursos, donde el control de la combustión y del proceso es riguroso y se apoya en análisis físico-químicos en línea o al menos por turno. En tanto por otro, operan instalaciones, incluso con deficiencias en la instrumentación, y análisis de muestra muy esporádicos.

En cualquiera de los casos descritos, es ventajoso contar con herramientas de computación, de variada complejidad, que apoyen la operación en planta y la toma de decisiones.

En este trabajo se presentan resultados de un programa de computación para la evaluación de desempeño de hornos de procesos de refinería de petróleo (Perfetti, J. C., 2020). Con base en la aplicación del programa para servicio de calentamiento para destilación de crudo, se hace una descripción del programa y bases de cálculo, y se ilustra su utilidad con un equipo real.

Horno de procesos

El horno de procesos o calentador de fuego directo (“direct fired heater”), es un intercambiador de calor que provee calor de combustión a corrientes de fluido (carga de alimentación), que circulan a través de tubos contenidos dentro de un encerramiento o cubierta metálica internamente aislada.

Los tubos se conectan en serie, uno tras otro, formando un serpentín de tubos que va desde la entrada a la salida del horno. Los serpentines de tubos se disponen en arreglos pares. Un horno de dos pasos tiene dos serpentines.

El horno evaluado en este trabajo es similar al esquematizado en la Fig. 1. Dicha figura, disponible en Internet, adaptada de un manual de diseño de proceso de PDVSA (PDVSA-MDP, 1995), es un esquema de horno vertical cilíndrico con sección de convección horizontal.

Los hornos verticales cilíndricos son muy usados en la industria petrolera y petroquímica para rendimientos térmicos de hasta $1,50 \times 10^8$ Btu/h. El rendimiento térmico es el calor total absorbido ("heat duty") por todas las corrientes de proceso.

La Fig. 1 describe las secciones del horno e ilustra la ubicación de los indicadores de variables de operación del lado del fuego. Por simplicidad, se indica TI en lugar de indicador de temperatura. Los indicadores de variables de operación del lado del proceso se sobreentiende que están ubicados en la tubería de entrada y salida al horno.

En la Fig. 1 se ilustra la ubicación de los siguientes indicadores:

- Indicador % Oxígeno, el cual mide el contenido de Oxígeno residual de los gases de combustión, % v/v en base seca. Se ubica en la sección de convección.
- TI arco radiante, el cual mide la temperatura de los gases de combustión a la salida de la sección de radiación del horno. Este indicador de temperatura también se conoce como temperatura de pared divisoria ("Bridgewall Temperature").

La sección de radiación también conocida como cámara de combustión u hogar del horno, es la estructura que circunda a los tubos radiantes y a los quemadores.

- TI de piel de tubo, el cual mide la temperatura en la superficie externa de tubo. Esta temperatura se mide en varios tubos radiantes a objeto de obtener un valor promedio.
- TI salida banco convectivo, el cual mide la temperatura de los gases de combustión a la salida de la sección de convección del horno.

La carga de alimentación (petróleo crudo) se distribuye según los pasos del horno, e ingresa por la sección de convección. El horno evaluado en este trabajo tiene dos pasos y quema Gas. A continuación la carga pasa por la sección de protección, se desvía fuera del horno por la tubería de transición, ingresa a la sección de radiación, y sale finalmente del horno proveniente del último tubo de dicha sección.

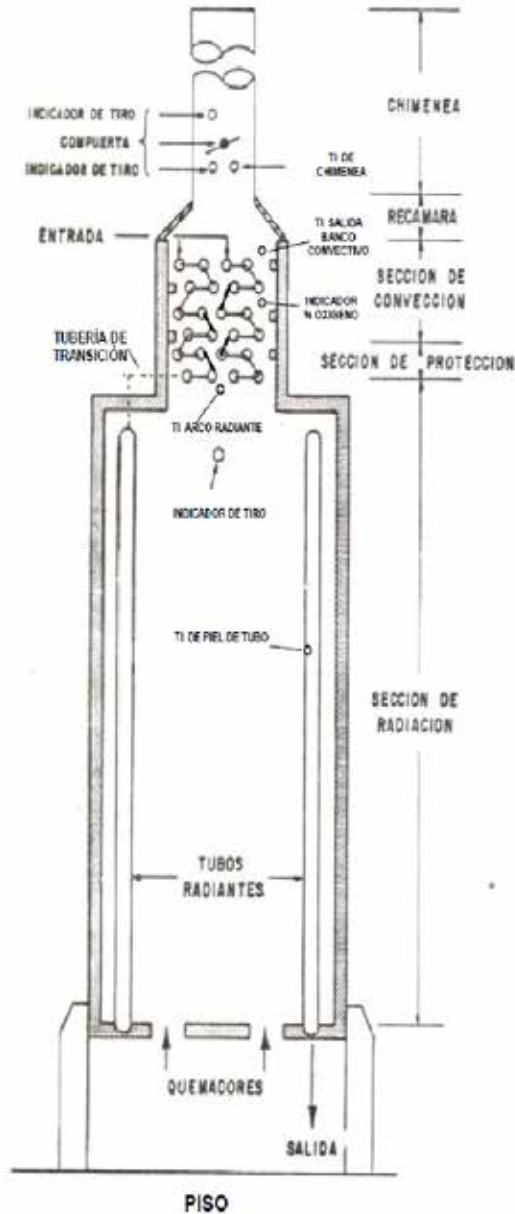


Fig. 1. Esquema horno vertical de sección de convección horizontal (PDVSA-MDP, 1995)

Por el lado del fuego, la corriente de aire de combustión y la de Gas ingresan al hogar del horno a través de los quemadores. En el horno evaluado el aire ingresa por tiro natural. En los quemadores se mezclan las corrientes, reaccionando Oxígeno y carburantes produciendo llama y gases de combustión calientes, que transfieren calor al fluido que circula por los tubos de serpentín que están dispuestos en la sección de radiación del horno (tantos serpentines como pasos del horno).

Los gases continúan su trayecto y transfieren calor por convección al fluido que circula por los tubos que forman el banco convectivo. Luego de lo cual, los gases de combustión salen del horno a través de la chimenea.

Según la configuración del horno, parte del banco convectivo puede quedar expuesto a radiación térmica proveniente del hogar del horno, que es el caso del horno evaluado. El banco convectivo está formado por las filas de tubos horizontales que conforman las secciones de protección y de convección.

Los tubos de c/u de los dos serpentines por donde circula el crudo, están alineados verticalmente formando un círculo contenido en el hogar del horno.

Las primeras dos filas de tubos que siguen a continuación del hogar del horno constituyen la sección de protección (tubos lisos). Las siguientes filas del banco, seis en el caso evaluado, constituyen la sección de convección, la cual está formada por tubos con superficie extendida; aletas en el caso evaluado.

Las filas de tubos con aletas se usan para compensar los relativamente pobres coeficientes de transferencia de calor por convección.

Evaluación estándar del desempeño térmico de hornos

La evaluación estándar del desempeño térmico de hornos en la industria petrolera y química en general (refinerías de petróleo, complejos petroquímicos, plantas de procesamiento de Gas Natural, etc.), se realiza con base en referencias tales como la norma API 560, que se aplica a hornos de procesos de uso general como los utilizados en refinerías de petróleo (American Petroleum Institute, 2001).

La Fig. 2 representa el diagrama de flujo simplificado de un programa de computación para la evaluación de hornos con base en la referida norma aplicada a Gas. Ese programa funciona como subrutina del programa de computación de este trabajo (Fig. 3). La etiqueta "Entrada", engloba las variables operacionales a registrar para la evaluación, en tanto "Salida", se refiere a las variables calculadas. En la Fig. 2 y la Fig. 3 se incluye un conjunto de variables que facilitan el seguimiento del programa de computación.

El flujo de Gas se especifica en planta a condiciones estándar de presión y temperatura. La composición del combustible se especifica en % molar.

La resolución del balance de masas del lado del fuego se describe detalladamente en la norma API 560. La condición de referencia es presión atmosférica y 60 °F.

El calor liberado Q_{lib} (Btu/h) se obtiene de:

$$Q_{lib} = F_{comb} \cdot PCI \quad (1)$$

Donde, F_{comb} (lb/h) es el flujo de combustible; y PCI (Btu/lb) es la potencia calorífica inferior, la cual se puede calcular mediante una norma (American Society for Testing and Materials, 2003).

Entrada

Flujo de combustible, composición de combustible.
Oxígeno residual en gases de combustión o exceso de aire.
Temperatura de gases de combustión:
Salida de la sección de radiación T_g .
Salida de la sección de convección T_{gsal} .



Salida

Flujo de aire, flujo/composición de gases de combustión.
Calor liberado Q_{lib} , calor absorbido en la sección de radiación Q_{srad} , calor absorbido por convección en el banco convectivo Q_{conv} , pérdidas por chimenea Q_{ch} , pérdidas de pared Q_p .
Eficiencia térmica .

Fig. 2. Diagrama de flujo de programa de computación para la evaluación de hornos con base en la norma API 560

El calor absorbido en la sección de radiación, Q_{srad} (Btu/h), se obtiene del siguiente balance de calor del lado del fuego:

$$Q_{srad} = Q_{lib} + Q_a - Q_p - Q_g \quad (2)$$

Donde, Q_a (Btu/h) es el flujo de entalpía del aire de combustión; Q_p (Btu/h) es el calor perdido por las paredes (2% de Q_{lib} es factor de diseño del caso de evaluado); Q_g (Btu/lb) es

el flujo de entalpía de los gases de combustión que se enfrían hasta la temperatura de arco radiante T_g (°F).

El calor total absorbido o rendimiento térmico del horno, Q_{abs} (Btu/h), se obtiene de:

$$Q_{abs} = Q_{lib} + Q_a - Q_p - Q_{gsal} \quad (3)$$

Donde, Q_{gsal} (Btu/h), es el flujo de entalpía de los gases de combustión que salen de la sección de convección hacia la chimenea a T_{gsal} (°F).

De modo que el calor absorbido por convección en el banco convectivo, Q_{conv} (Btu/h), viene dado por:

$$Q_{conv} = Q_g - Q_{gsal} \quad (4)$$

La eficiencia térmica η (%) viene dada por:

$$\eta = Q_{abs}/Q_{lib} \cdot 100 \quad (5)$$

En el caso de hornos sin precalentamiento del aire de combustión como el caso evaluado, Q_a es despreciable, y la eficiencia térmica corresponde en la práctica a la eficiencia del combustible.

La utilidad de los resultados que se obtienen con base en la norma API 560, es su uso para evaluar el desempeño térmico de hornos de refinería de petróleo en general. Para diagnóstico y para cuantificación de mejoras operacionales.

Programa de computación para evaluar hornos segmento a segmento de serpentín

El objetivo primario del programa de computación desarrollado es servir como herramienta para apoyar la operación, buen desempeño y mejoras operacionales de hornos de procesos, a través de un diagnóstico más preciso y detallado que el realizado con base en la evaluación estándar.

El programa es de elaboración propia y está codificado en el lenguaje de programación Fortran 95.

La Fig. 3 representa el diagrama de flujo simplificado del programa. Éste utiliza datos del combustible y datos del lado de los gases de combustión, al igual que en el caso de la evaluación estándar. En cuanto a la carga de alimentación, utiliza datos de las condiciones de operación (variables de entrada del horno, perfil de presión) y curvas de propiedades físicas que el programa usa como subrutinas. Las curvas de propiedades físicas se pueden

obtener corriendo modelos de separación instantánea líquido/vapor utilizando simuladores de procesos como PRO/II (Schneider Electric SimSci, 2018).

En cuanto al equipo, el programa de computación utiliza los siguientes datos:

- Superficies de transferencia de calor: aspectos de configuración en la sección de radiación y en el banco convectivo, y especificación de tuberías y superficies extendidas.
- Superficies de refractario: áreas de superficie de las secciones involucradas.
- Aberturas del banco convectivo.
- Factores de transferencia de calor. En este trabajo esto incluye: factores de ensuciamiento interno de tubos y factores asociados a la sección de convección (factores de ajuste). Éstos últimos se usan cuando el calor absorbido en la sección de convección sea claramente inferior al esperado, según datos de diseño y factores de ensuciamiento congruentes con la operación.

El programa evalúa el problema de transferencia de calor en las secciones de radiación y convección, con la sección de protección en común. La solución se obtiene cuando ambos problemas convergen a la temperatura de arco radiante, y a la temperatura de la carga a la entrada de la sección de radiación.

El perfil de temperatura del petróleo crudo a lo largo del serpentín de tubos, se obtiene a partir de la resolución de balances de entalpía, por sección del horno, y por segmento de serpentín. En paralelo el programa resuelve la ecuación respectiva de transferencia de calor, por sección del horno, y por segmento de serpentín.

La temperatura de los gases de combustión en el arco radiante es una variable registrada en planta. El programa calcula esta variable al evaluar el calor absorbido en la sección de radiación, Q_{rad} , cumpliendo la siguiente relación:

$$Q_{\text{rad}} = Q^{\text{rad}}_{\text{srad}} + Q^{\text{conv}}_{\text{srad}} \quad (6)$$

Donde, $Q^{\text{rad}}_{\text{srad}}$, $Q^{\text{conv}}_{\text{srad}}$, son respectivamente, calor absorbido por radiación en la sección de radiación, y calor absorbido por convección en la sección de radiación.

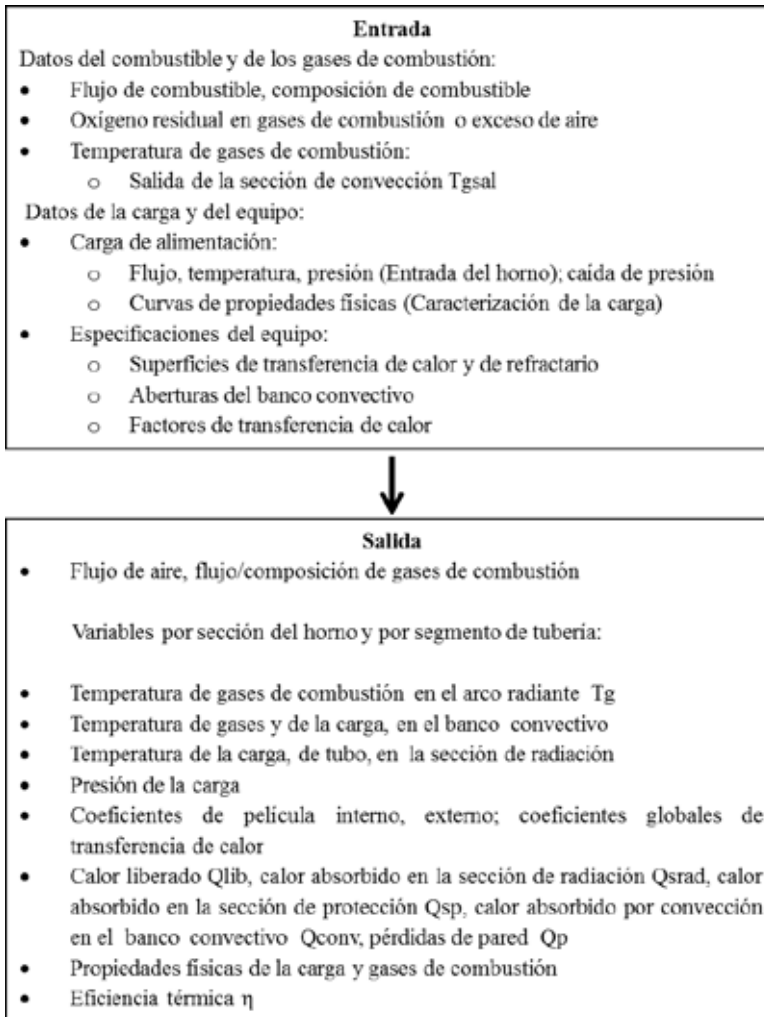


Fig. 3. Diagrama de flujo de programa de computación para evaluar hornos de procesos, segmento a segmento de tubería

La sección de protección del horno evaluado está directamente expuesta a la radiación del hogar del horno, de modo que Q_{srad} incluye calor absorbido por radiación en la sección de protección.

Para la evaluación de los términos de la ec. (6) se utiliza el Método de Lobo y Evans, que usa una ecuación de tipo Stefan-Boltzmann con un factor total de intercambio F , y una ecuación de calor por convección, respectivamente. Este método se explica en detalle en "Procesos de Transferencia de Calor" (Kern, D. Q., 1973).

Cuando la sección de convección no está directamente expuesta a la radiación de la sección de radiación, $Q^{\text{rad}}_{\text{srad}}$ viene dado por:

$$Q^{\text{rad}}_{\text{srad}} = \alpha \cdot A_{\text{cp}} \cdot F \cdot \sigma [(T_g)^4 - (T_s)^4] \quad (7)$$

Donde: σ , es la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 0,1713 \times 10^{-8}$ Btu/h-pie²-°R; T_s es la temperatura promedio de piel de tubo en la sección de radiación, °R; $\alpha \cdot A_{\text{cp}}$, es la superficie fría efectiva de la sección de radiación, pie².

El horno evaluado en este trabajo cuenta con una sección de protección en el fondo del banco convectivo, por lo que debe sumarse la superficie fría efectiva de la sección de protección, A_{csp} . Dicha superficie se puede obtener a partir de las aberturas del banco convectivo o de la superficie plana de los tubos de protección.

De manera que $Q^{\text{rad}}_{\text{srad}}$ para el caso evaluado viene dado por:

$$Q^{\text{rad}}_{\text{srad}} = (\alpha \cdot A_{\text{cp}} + A_{\text{csp}}) F \cdot \sigma [(T_g)^4 - (T_s)^4] \quad (8)$$

El calor absorbido por convección en la sección de radiación se obtiene a partir de:

$$Q^{\text{conv}}_{\text{srad}} = 2A_{\text{cp}} \cdot h \cdot (T_g - T_s) \quad (9)$$

Donde h es el coeficiente de película de los gases de combustión; $h = 2$ Btu/h-pie²-°F es un valor de referencia aceptado.

El calor absorbido por radiación en el horno, $Q^{\text{rad}}_{\text{srad}}$, a conveniencia se desglosa como:

$$Q^{\text{rad}}_{\text{srad}} = Q^{\text{rad}}_{\text{hogar}} + Q^{\text{rad}}_{\text{sp}} \quad (10)$$

Con:

$$Q^{\text{rad}}_{\text{sp}} = F_{\text{sp}} \cdot Q^{\text{rad}}_{\text{hogar}} \quad (11)$$

Donde, $Q^{\text{rad}}_{\text{hogar}}$, $Q^{\text{rad}}_{\text{sp}}$, son respectivamente, calor absorbido por radiación en el hogar del horno, y calor absorbido por radiación en la sección de protección.

F_{sp} , es un factor de diseño para estimar el calor radiado desde el hogar del horno a los tubos de protección. Este factor está definido en un manual de diseño de proceso de PDVSA que no está disponible en Internet, por lo que no se especifica aquí (PDVSA-PD, 1986).

El flujo de entalpía del crudo desde la entrada del horno hasta la entrada de la sección de radiación es:

$$Fc \cdot (h_{ceh} - h_{ce}) = Q_{conv} + Q_{rad,sp} \quad (12)$$

Donde, Fc (lb/h), es el flujo másico de crudo, y h_{ceh} , h_{ce} , son respectivamente, entalpía específica a la entrada de la sección de radiación, y a la entrada del horno.

La ecuación de transferencia de calor, Q , viene dada en forma genérica por:

$$Q = A_o U_o \Delta T \quad (13)$$

Donde, A_o es el área de transferencia de la superficie externa total de tubo correspondiente, incluyendo la superficie extendida si el tubo está revestida de la misma; U_o , es el coeficiente global de transferencia de calor basado en la superficie externa total de tubo correspondiente, Btu/h-pie²-°F; ΔT , es la diferencia global de temperatura asociado al coeficiente U_o correspondiente.

U_o se puede calcular de la siguiente ecuación de la sección de "Transmisión de Calor" en (Perry, R. H; Green, D. W, 1984)

$$1/U_o = 1/h_o + R_{do} + xA_o/(kA_{prom}) + (1/h_i)A_o/A_i + R_{di}A_o/A_i \quad (14)$$

Donde, A_i , A_{prom} , son respectivamente, área de transferencia de la superficie interna de tubo, y área de transferencia basada en el diámetro medio de tubo; h_o , h_i , respectivamente, coeficiente de película de los gases de combustión, y del crudo; x , es el espesor de pared de tubo; k , es la conductividad térmica de tubo; R_{do} , R_{di} , respectivamente, factor de ensuciamiento externo de tubo, factor de ensuciamiento interno de tubo, h-pie²-°F/Btu. R_{do} en nulo para quema de Gas.

Para la sección de radiación se calcula el calor absorbido, tubo a tubo. Para la sección de convección y la sección de protección, se calcula el calor absorbido fila por fila de tubos del banco convectivo.

Para calcular el coeficiente de película del crudo en los tubos de la sección de radiación, h_i , se usa el trabajo de (Chen, J. C., 1966).

Para calcular el coeficiente de película del crudo en los tubos del banco convectivo, h_i , se usa el trabajo de (Sieder y Tate, 1936).

Para calcular el coeficiente de película de los gases de combustión a través de los tubos del banco convectivo (tubos lisos, tubos con superficie extendida), h_o , se usan correlaciones en función de la temperatura y régimen de flujo de los gases de combustión. Éstas no están disponibles en Internet por lo que no se publican aquí (PDVSA-PD, 1986).

Para los tubos con superficie extendida, A_o se reemplaza por la superficie efectiva A_{oe} , la cual se define como:

$$A_{oe} = A_{uf} + A_f \Omega \quad (15)$$

Donde, A_{uf} es la superficie expuesta de tubo liso, A_f es la superficie extendida neta, y Ω es la eficiencia de aleta.

La ec. (15) se explica en la sección de “Transmisión de Calor” en (Perry, R. H; Green, D. W, 1984).

La eficiencia de aleta Ω se usa como factor de transferencia de calor para ajustar la superficie efectiva A_{oe} , en caso que sea necesario (ver Fig. 3).

Resultados

En este trabajo se describen condiciones de proceso de un equipo real, con el fin de ilustrar la aplicación del programa de computación como herramienta de evaluación de desempeño. No se incluyen especificaciones de las superficies de transferencia de calor y otros datos de diseño específicos.

En la Tabla 1 se compara el programa de computación con datos de diseño de un horno de calentamiento de petróleo crudo para destilación atmosférica (Meneven, 1977).

El horno calienta 40.000 BPD de crudo de 38,4 °API, de 297 a 570 °F, pasando de 182 a 25 psia. El equipo quema Gas de 1.200 Btu/pie³ estándar de potencia calorífica superior (PCS) a 20% de exceso de aire, liberando calor a razón de 129,3 x 10⁶ Btu/h (basado en PCI). Los gases de combustión salen del horno a 500 °F.

Se observa que el programa compara muy bien en general con diseño, con desviaciones relativas en el intervalo de 0,4 4%, excepto con la temperatura de arco radiante T_g , donde el programa supera en más de 16% al valor de diseño. Sobre este último resultado se extiende el análisis más adelante, aprovechando la comparación del programa con datos reales de planta.

Cabe precisar que se seleccionaron factores de ensuciamiento (solo interno porque se quema Gas), ya que no están especificados en diseño. El programa utilizó 0,006 h-pie²-°F/Btu para los tubos de la sección de radiación, y 0,001 h-pie²-°F/Btu para los tubos del banco convectivo. Esta selección es consistente con servicios de calentamiento en refinerías de petróleo (Perry, R. H; Green, D. W, 1984).

Tabla 1.
Comparación del programa de computación y datos de diseño de un horno de calentamiento de petróleo crudo para destilación (Meneven, 1977)

| Variable | Unidad | Diseño | Programa | Desv. relativa (%) |
|--|--------------------------|--------|----------------------|--------------------|
| Temperatura de piel de tubo del hogar | °F | 610 | 603 | 1,1 |
| Temperatura de los gases de combustión en el arco radiante | °F | 1.310 | 1.525 | 16,4 |
| Temperatura del crudo a la salida del horno (salida del último tubo) | °F | 570 | 565 | 0,9 |
| Temperatura del crudo a la entrada del hogar del horno | °F | - | 432 | |
| Fracción másica vaporizada a la salida del horno | % | 58,0 | 57,7 | 0,5 |
| Coefficiente de película del crudo en el hogar del horno | Btu/hpie ² °F | 1.092 | 1.054 | 3,5 |
| Coefficiente de película del crudo en la sección convectiva | Btu/hpie ² °F | 370 | 354 | 4,3 |
| Calor absorbido por el crudo | 10 ⁶ Btu/h | 112,0 | 111,5 ^(a) | 0,4 |
| Eficiencia del horno | % | 86,6 | 86,2 ^(a) | 0,5 |

Nota:

(a): El calor absorbido es el estimado con base en la implementación de la norma API 560 para evaluación de hornos. Las pérdidas de pared por diseño se estiman en 2% del calor liberado.

La Tabla 2 compara el programa de computación con datos de una prueba de capacidad realizada en planta, la cual fue un esfuerzo por establecer si el horno podía operar a condiciones de diseño. La prueba revestía gran interés, ya que se hizo después de un cambio de quemadores, con los cuales se tenía gran expectativa de conseguir que el horno operara a condiciones de diseño (Jiménez, D., 1984).

La prueba transcurrió durante un turno en condiciones estables a 37.000 BPD de crudo de 39,8 °API, de 338 a 540 °F, pasando de 215 a 30 psia, quemando 93.005 pie³/h estándar de Gas de 1.221 Btu/pie³ estándar (PCS), a 27,9 % de exceso de aire. La temperatura de los gases de combustión de salida se ubicó en 697°F.

En la Tabla 2 se observa que el programa compara muy bien con los registros y resultados del evento, con desviaciones relativas en el intervalo de 0,44,4 %. La temperatura de arco radiante calculada por el programa es 1,2% superior al valor registrado en la prueba. Se utilizaron los mismos factores de ensuciamiento interno que se utilizaron para la comparación con diseño.

Los resultados de calor absorbido de la prueba, son los que se obtienen con base en implementar la norma API 560 (balance de calor del lado de los gases de combustión).

Por su parte, los resultados de calor absorbido del programa de computación corresponden a la totalización de la sección respectiva, calculado mediante el modelo respectivo de transferencia de calor a través de tubo.

Para la estimación de propiedades físicas del crudo se usaron las mismas curvas empleadas para la comparación con diseño.

Tabla 2.
Comparación del programa de computación y una prueba de planta del horno de destilación de crudo evaluado en este trabajo (Jiménez, D.,1984)

| Variable | Unidad | Prueba | Programa | Desv. relativa (%) |
|---|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| Temperatura de gases de combustión en el arco radiante | °F | 1.410 | 1.427 | 1,2 |
| Temperatura del crudo a la salida del horno | °F | 540 | 564 | 4,4 |
| Temperatura del crudo a la entrada del hogar del horno. | °F | | 433 | |
| Calor liberado (basado en PCI) | 10 ⁶ Btu/h | 103,1 ^(b) | 103,1 ^(a) | - |
| Calor absorbido por el crudo | 10 ⁶ Btu/h | 82,2 ^(a) | 81,9 | 0,4 |
| Calor absorbido sección de radiación | 10 ⁶ Btu/h | 58,6 ^(a) | 58,2 | 1,5 |
| Calor absorbido por convección en el banco convectivo | 10 ⁶ Btu/h | 23,6 ^(a) | 23,7 | 0,4 |
| Eficiencia térmica (basado en PCI) | % | 79,7 ^(a) | 79,4 | 0,4 |

Notas:

(a): Calculado con base a método empleado en refinerías, correspondiente a la implementación basada en la norma API 560 o equivalente.

(b): Calor liberado es el mismo en ambos casos ya que se asumió la misma composición de Gas estimada.

La Tabla 3 describe algunos resultados del programa de computación para el caso de la prueba de planta, fila por fila de tubos del banco convectivo.

En la Tabla 3 se muestra la temperatura del crudo a la salida del último tubo de cada fila de tubos del banco convectivo, desde la 1ra. fila del banco convectivo al fondo del mismo, donde alcanza 433 °F. Esta última corresponde a la temperatura de entrada al hogar del horno indicada en la Tabla 2.

En dicha tabla también se muestra la temperatura de los gases de combustión, desde antes de la 1ra. fila del banco convectivo a 774 °F, a antes de la 8va. fila a 1.427 °F. Esta última corresponde a la temperatura de los gases de combustión en el arco radiante indicada en la Tabla 2.

Asimismo, la Tabla 3 muestra el calor por convección que absorben los tubos del banco convectivo fila por fila, hasta totalizar $23,7 \times 10^6$ Btu/h. Este valor corresponde al calor por convección absorbido en el horno de la prueba de planta que indica la Tabla 2.

En relación a la eficiencia de aleta Ω mostrada en la Tabla 3, cabe señalar que el valor de cada fila es un valor referencial calculado con base en datos de diseño de superficie extendida. Ese valor de eficiencia de aleta Ω_{no} es usado por el programa para evaluar la superficie efectiva A_{oe} del banco convectivo.

Tabla 3.
Resultados del programa de computación aplicado al caso de la prueba del horno de destilación de crudo, fila por fila de tubos del banco convectivo.

| Nº de fila | Temperatura del gas de combustión antes de la fila (°F) | Temperatura del crudo a la salida del último tubo de la fila (°F) | Coefficiente de película del gas de combustión (Btu/hpie ² °F) | Eficiencia de aleta Ω | Calor absorbido por el crudo (Btu/h) |
|------------|---|---|---|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 774 | 347 | 3,15 | 0,808 | 2.387.476 |
| 2 | 861 | 358 | 3,26 | 0,803 | 2.721.715 |
| 3 | 964 | 370 | 3,37 | 0,797 | 3.311.862 |
| 4 | 1080 | 385 | 3,50 | 0,790 | 3.741.672 |
| 5 | 1219 | 401 | 3,64 | 0,784 | 4.558.195 |
| 6 | 1.348 | 415 | 3,78 | 0,776 | 4.265.448 |
| 7 | 1.387 | 425 | 3,78 | | 1.313.677 |
| 8 | 1.427 | 433 | 3,81 | | 1.368.093 |

Discusión de resultados

En la Tabla 1, la atención se centra en la desviación entre el programa y datos de diseño en la temperatura de los gases de combustión en el arco radiante, del orden del 16%.

La condición de los tubos queda definida con la temperatura de piel, donde la desviación relativa entre el programa y diseño es muy estrecha, del orden del 1%.

Dado que esa desviación es prácticamente despreciable, queda entonces claro que la causa de la desviación en la temperatura de gases de combustión en el arco radiante en 16%, sólo podría estar en el modelado del calor transferido por la nube de gases de combustión a los tubos o por inconsistencia en el dato de diseño de 1.310 °F.

En la Tabla 2, nuevamente se centra la atención en la temperatura de los gases de combustión en el arco radiante, donde se aprecia una estrecha diferencia del programa respecto al caso de planta, de 1.427 versus 1.410 °F, respectivamente (1,2%).

Merece destacar que el comportamiento de alta temperatura de T_g respecto a diseño de 1.310 °F, se presentaba en planta a condiciones de carga cercanas a diseño desde la puesta en servicio de la unidad en 1977. Al menos hasta donde se tiene registro para este trabajo, ese comportamiento se presentaba en planta todavía en 1986 (Torrez, T., 1986).

La muy buena correspondencia en la temperatura de arco radiante entre el programa de computación y la prueba de planta, sumado al comportamiento histórico de esa variable a condiciones cercanas a diseño, lleva a deducir que el valor especificado en diseño de 1.310 °F es un valor subestimado que no se corresponde con lo esperado.

En relación a la eficiencia de aleta Ω mostrada en la Tabla 3 (valor promedio de 0,793), cabe señalar que contrasta con el valor de 0,385 por fila que se tuvo que usar como parámetro de ajuste para obtener el calor absorbido por convección, Q_{conv} , de $23,7 \times 10^6$ Btu/h indicado en la Tabla 2.

El que la eficiencia de aleta Ω del caso real evaluado se tuvo que reducir prácticamente a la mitad del valor esperado por prácticas de Ingeniería, lleva al menos a establecer dos razones posibles: (1) Superficie extendida en realidad mucho menor que la especificada en diseño; (2) Deterioro de la superficie extendida (aletas) en grado significativo.

Lo anterior encuentra sentido en el hecho que la información que se tuvo de planta para la época, indicaba tubos al rojo vivo en al menos las filas 5 y 6 del banco convectivo (Lucena, R., 1982), sin evidenciar ensuciamiento interno que lo justificara (Lucena, R., 1989). Esas filas son las dos siguientes a las dos filas de protección.

El parámetro de ajuste usado (Ω), permitió lograr que la temperatura de los gases de combustión aguas arriba del fondo del banco convectivo resultara en 1.427 °F, y que la temperatura del crudo a la entrada del hogar del horno resultara en 433 °F.

Conclusiones

- El programa de computación permite evaluar el desempeño de hornos de procesos a partir de data operativa, segmento a segmento de serpentín. La herramienta calcula variables de registro en planta y, variables y parámetros de ingeniería a lo largo del recorrido del crudo y gases de combustión, expandiendo la capacidad de apoyo a las operaciones.
- El programa se usó para comparar con datos reales de una prueba de planta, encontrándose desviaciones del orden de 1% para la temperatura de arco radiante (1.427 °F programa vs. 1.410 °F planta), y similar desviación para el calor absorbido y la eficiencia, en tanto del orden de 4% para la temperatura de salida del crudo.
- La muy buena correspondencia en la temperatura de arco radiante entre el programa de computación y la prueba de planta, sumado al comportamiento histórico de esa variable a condiciones cercanas a diseño, lleva a deducir que el valor especificado en diseño de 1.310 °F es un valor subestimado.
- Estas evidencias con la relación a la temperatura de arco radiante, sirven para establecer que el programa muestra potencial para la evaluación del diseño de la sección de radiación de hornos de proceso.
- Para poder enfriar los gases de combustión todo lo esperado (1.427 a 697 °F), usando factores de ensuciamiento acordes, se usó la eficiencia de aleta como parámetro de ajuste y la misma se redujo en 50%. Esto conlleva como posible explicación el daño de superficie extendida o superficie menor que la especificada en diseño.
- Este ajuste del área efectiva del banco convectivo ofrece una explicación de cómo lograr el calor absorbido por convección en esa parte del horno evaluado, toda vez que la información dada por planta de filas de tubos al rojo vivo, en condición de severo estrés, no fue a causa de ensuciamiento interno.

Referencias

- American Petroleum Institute (2001). Fired Heaters for General Refinery Service. API Standard 560, Third edition, Estados Unidos de America.
- American Society for Testing and Materials (2003). Standard Practice for Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density of Gaseous Fuels. ASTM Standard D 3588 - 98, Estados Unidos de America.
- Chen, J. C. (1966). Correlation for boiling heat transfer to saturated liquids in convective flow. *Ind. Eng. Chem. Process Design and Development*, 5, p. 322.
- Jiménez, D. (1984). *Evaluación del Horno H-1 bajo condiciones de diseño – Unidad DA-3. Memorandum PIP-11-84*. Manuscrito no publicado, Dpto. Programación e Ingeniería de Procesos, Refinería Puerto la Cruz, Venezuela.
- Kern, Donald Q. (1973). *“Procesos de Transferencia de Calor”*.
- Lucena, R. (1982). *Informe de la evaluación del horno del Chaure llevada a cabo en Tulsa Oklahoma durante los días 1 y 2 de junio de 1982*. Manuscrito no publicado, Dpto. Planificación e Ingeniería de Procesos, Refinería Puerto la Cruz, Venezuela.
- Lucena, R. (1989). Conversación telefónica con J. C. Perfetti. Dpto. Programación e Ingeniería de Procesos, Refinería Puerto la Cruz, Venezuela.
- Meneven (1977). *Hojas de especificación Horno H-1, Unidad DA-3*, Refinería Puerto la Cruz, Venezuela.
- PDVSA-MDP (1995). *“Hornos: Principios Básicos”*. Manual de Diseño de Proceso, sección Hornos, Venezuela.
- PDVSA-PD (1986). *Prácticas de Diseño (Sección Hornos)*, Venezuela.
- Perfetti, J. C. (2020). “Programa de computación para la evaluación térmica de hornos de procesos, segmento a segmento de serpentín de tubos”. Archivos fuente en Fortran 95 propiedad del autor, Venezuela.
- Perry, R. H; Green, D. W. (1984). “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”, Heat Transmission Section, Sixth Edition, Estados Unidos de América.
- Schneider Electric SimSci (2018). Simulador de procesos PRO/II, Versión 9.4, Estados Unidos de América.
- Torrez, T. (1986). *Mejoras al Horno H-1 de la Unidad DA-3”. Informe de selección de quemador HEVD-20*. Manuscrito no publicado, Dpto. Programación e Ingeniería de Procesos, Refinería Puerto la Cruz, Venezuela.

