

Evaluación energética de los intercambiadores de sistema de media presión de la planta de  
Polietileno II de la Gerencia Refinería Barrancabermeja

Laura Viviana Martínez Lamus

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Química

Director

Gustavo Emilio Ramírez Caballero

PhD. Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Codirector

Pedro Elías Herrera Betancourth

MSc. Ingeniería Química

Arley Guerrero Mesa

Ing. Ambiental y de Saneamiento

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

A Dios por hacerme una mejor persona, por llenarme de fortaleza y sabiduría en todo momento, por no dejarme rendir durante el camino. Por ser mi mayor amigo y no abandonarme nunca.

A mis padres, Danilo y Gladys, por siempre ser mi mayor motivación y mi ejemplo a seguir. Por obsequiarme esta gran oportunidad, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible. Gracias por siempre confiar en mí, por brindarme sus consejos cada vez que los necesité. Su amor y acompañamiento fueron fundamentales para la culminación exitosa de este ciclo.

A mi hermano Camilo, por ser mi guía y cómplice en cada momento. Gracias por cada consejo, su apoyo siempre ha sido muy importante para mí.

A toda mi familia, quienes han sido testigos de mi esfuerzo, siempre han creído en mí y han estado ahí para ayudarme en cualquier momento.

A los amigos que me deja la Universidad, Pacho, Silvia y Laura, con quienes compartí momentos increíbles. Gracias por enseñarme tanto a lo largo de estos años, por su amistad y por tenerme tanta paciencia.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Química y todos sus docentes, por brindarme el espacio para formarme como profesional, la oportunidad de crecer como persona y de amar esta profesión.

A Ecopetrol y al Departamento de Petroquímica por la oportunidad de crecer como profesional, por acompañarme y aconsejarme durante este proceso.

A Arley Guerrero Mesa y a Pedro Elías Herrera quienes, con su colaboración, consejos, correcciones y enseñanzas, permitieron la culminación de este trabajo.

A los operadores de Polietileno por su acogida, motivación y paciencia para resolver mis dudas.

**Tabla de Contenido**

|  |    |
|--|----|
| Introducción.....  | 2  |
| 1. Marco Teórico .....   | 4  |
| 1.1. Presentación de la empresa .....                                  | 4  |
| 1.2. Descripción del proceso .....                                     | 5  |
| 1.2.1. Intercambiadores del sistema de media presión .....             | 6  |
| 1.3. Polietileno.....  | 8  |
| 1.3.1. Síntesis .....  | 8  |
| 1.4. Energía .....   | 9  |
| 1.4.1. Transferencia de calor.....                                     | 9  |
| 1.4.2. Transferencia de trabajo .....                                  | 11 |
| 1.4.3. Primera ley de la termodinámica .....                           | 11 |
| 1.4.4. Segunda ley de la termodinámica .....                           | 11 |
| 1.5. Intercambiadores de calor .....                                   | 12 |
| 1.5.1. Intercambiadores de calor de tubos y coraza .....               | 12 |
| 1.5.2. Método de la eficiencia NTU de un intercambiador de calor ..... | 13 |
| 1.6. Simulación de procesos.....                                       | 14 |
| 1.6.1. Simulador Aspen HYSYS .....                                     | 15 |
| 2. Objetivos.....  | 16 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1. | Objetivo general .....   | 16 |
| 2.2. | Objetivos específicos.....   | 16 |
| 3.   | Alcance .....  | 17 |
| 4.   | Metodología.....   | 18 |
| 4.1. | Diagnóstico de la sección .....                                    | 18 |
| 4.2. | Simulación de los intercambiadores y cálculo de la eficiencia..... | 20 |
| 4.3. | Análisis de datos de eficiencia y operación .....                  | 21 |
| 4.4. | Proposición de alternativa de mejora .....                         | 21 |
| 5.   | Resultados.....  | 22 |
| 5.1. | Diagnóstico de la sección .....                                    | 22 |
| 5.2. | Simulación de los intercambiadores y cálculo de la eficiencia..... | 24 |
| 5.3. | Análisis de datos de eficiencia y operación .....                  | 27 |
| 5.4. | Proposición de alternativa de mejora .....                         | 31 |
| 6.   | Conclusiones.....  | 35 |
| 7.   | Recomendaciones .....  | 36 |
|      | Referencias Bibliográficas.....                                    | 38 |
|      | Apéndices .....  | 41 |

**Lista de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Tags de los equipos                  | 24 |
| Tabla 2 Validación de la simulación          | 25 |
| Tabla 3 Validación del balance de energía    | 26 |
| Tabla 4 Calor máximo y eficiencia            | 26 |
| Tabla 5 Resultados de las mejoras propuestas | 35 |

**Lista de Figuras**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Temperatura de salida del intercambiador E2253A | 3  |
| Figura 2 Diagrama petroquímico GRB                       | 5  |
| Figura 3 Diagrama general de la unidad de Polietileno II | 7  |
| Figura 4 Intercambiador de calor de tubos y coraza       | 13 |
| Figura 5 Diagrama metodológico                           | 19 |
| Figura 6 Ruta del gas etileno                            | 23 |
| Figura 7 Eficiencia de E2256                             | 28 |
| Figura 8 Eficiencia E2258A                               | 29 |
| Figura 9 Eficiencia E2257A                               | 30 |
| Figura 10 Eficiencia E2253A                              | 31 |
| Figura 11 Producción diaria                              | 32 |
| Figura 12 Simulación de los intercambiadores             | 32 |
| Figura 13 Esquema de la Mejora 1.1                       | 33 |
| Figura 14 Esquema de la Mejora 1.2                       | 33 |
| Figura 15 Esquema de la Mejora 2                         | 34 |
| Figura 16 Esquema de la Mejora 3                         | 34 |

**Lista de Apéndices**

|   |    |
|---|----|
| Apéndice A. Datos de PI y producción diaria 2.014 - 2.018 (Sección) | 41 |
| Apéndice B. Información de DataSheet de los intercambiadores        | 46 |
| Apéndice C. Datos de operación (Sección)                            | 48 |
| Apéndice D. Resultados de Workbook (Sección)                        | 57 |
| Apéndice E. Cálculo de eficiencia (Sección)                         | 61 |

## Resumen

**Título:** Evaluación energética de los intercambiadores de sistema de media presión de la planta de polietileno ii de la gerencia refinería Barrancabermeja\*

**Autora:** Laura Viviana Martínez Lamus\*\*

**Palabras clave:** Intercambiadores de calor, Eficiencia energética, Planta de polietileno, Aspen Hysys.

### Descripción:

La planta de Polietileno II de la GRB de Ecopetrol produce resinas de Polietileno de baja densidad. Se ha evidenciado un aumento en la temperatura del etileno que ingresa al reactor, disminuyendo el flujo de gas, la producción y la seguridad de la planta. Teniendo en cuenta las fechas de los mantenimientos, se estableció el intervalo de tiempo en el que se realizó el análisis de los pre-enfriadores. Con los datos de planta registrados, se calculó la eficiencia de estos equipos durante este periodo y se obtuvo una eficiencia promedio aproximadamente 30% menor que la de diseño, debido a que el gas que entra a los intercambiadores contiene polímeros de cadena corta que se solidifican al disminuir su temperatura y crean una capa de ensuciamiento que interfiere en la transferencia de calor. Finalmente, se propusieron tres alternativas de mejora, se simularon en Aspen Hysys v10 y se compararon las temperaturas de salida del E2253A en cada una. Se obtuvo un mejor resultado con la mejora 3, la cual consiste en circular el gas simultáneamente por ambos trenes, pues al disminuir la carga de cada equipo, se incrementa la velocidad del fluido, aumentando el coeficiente global de transferencia de calor.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero. PhD. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Codirector: Pedro Elías Herrera Betancourth. MSc. Ingeniería Química. Codirector: Arley Guerrero Mesa. Ing. Ambiental y de Saneamiento.

### Abstract

**Title:** Energy assessment of the medium pressure system heat exchangers of the polyethylene ii plant of the Barrancabermeja refinery\*

**Author:** Laura Viviana Martínez Lamus\*\*

**Palabras clave:** Heat exchangers, Energy efficiency, Polyethylene plant, Aspen Hysys.

#### Description:

Ecopetrol's GRB Polyethylene II plant produces low-density Polyethylene resins. An increase in the temperature of the gaseous ethylene entering the reactor has been evidenced, decreasing gas flow, production and increasing the risk in the plant. Taking into account the maintenance dates, the time interval in which the analysis of the gas pre-coolers was carried out was established. With the registered plant data, the efficiency of these equipment was calculated during this period and an average efficiency was obtained that is approximately 30% less than the design efficiency for each one, this occurs because much of the gas that enters the exchangers bring with them short-chain polymers and when their temperature decreases, they solidify themselves, creating fouling that interferes in heat transfer. Finally, three improvement alternatives were proposed, simulated in Aspen Hysys v10, and the outlet temperatures of E2253A were compared in each one. A better result was obtained with improvement 3, which consists of circulating the gas simultaneously through both trains, since by decreasing the feed of each equipment, the speed of the fluid increases, increasing the overall heat transfer coefficient.

---

\* Final thesis

\*\* Faculty of Physic and Chemistry Engineering-. Chemical Engineering School. Advisor: Gustavo Emilio Ramirez Caballero. PhD. Materials Science and Engineering. Advisor: Pedro Elías Herrera Betancourth. MSc. Chemical Engineering. Advisor: Arley Guerrero Mesa. Eng. Environmental and Sanitation.

## Introducción

La variabilidad del precio del petróleo en los últimos años es un tema sensible y de gran importancia para la situación económica del país, pues este sector representa un gran porcentaje en los ingresos nacionales. Sin embargo, se ha generado una discusión acerca de su uso, en la cual se debate su posible y futura desaparición como fuente energética, pero no como materia prima. Por ello, las multinacionales consideran que los compuestos petroquímicos son esenciales para que el barril sea más rentable (Sáenz V, 2018) y han comenzado a desarrollar esta industria para dar mayor valor a los productos derivados del petróleo.

Debido a esto, en Ecopetrol es necesario hacer que estas plantas sean altamente eficientes, pues según un vocero de la empresa (Sáenz V, 2018) el precio de algunos de estos productos es mayor que el del barril de gasolina. Además la producción de polietileno de baja densidad (LDPE) de las unidades de Polietileno I y II de la refinería de Barrancabermeja cubre la mayor parte de la demanda de plástico en el país destinada a la fabricación de juguetes, bolsas, empaques, botellas retornables, recubrimientos, aislantes, utensilios como platos, vasos y cubiertos, entre otros (Padilla Cadena, 2019, pág. 19).

En estas plantas se ha evidenciado una disminución en la producción luego de realizar los procesos de mantenimiento y limpieza programados en los equipos de estas unidades, lo cual afecta negativamente la ganancia y la imagen de la empresa, por incumplimiento a los clientes. Se han presentado escenarios en los que ha sido necesario detener la operación para realizar nuevamente limpieza en los equipos. Esta disminución es causada por la pérdida de eficiencia de los equipos durante el proceso.

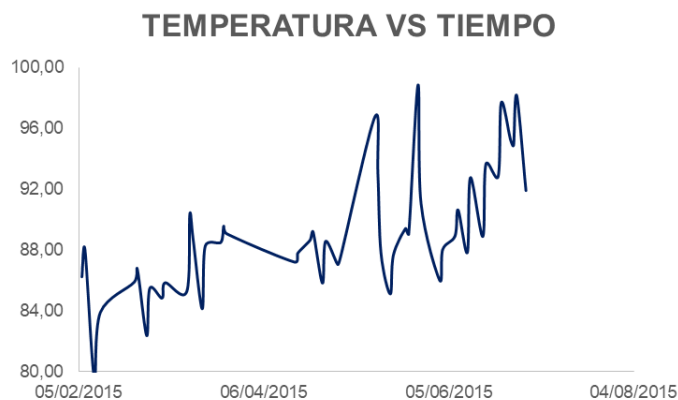
Como es el caso de los intercambiadores E2256, E2258A/B, E2257A/B, E2253A/B. Aquí, se lleva a cabo una etapa de enfriamiento del gas que entra al reactor, siendo esta la única fuente

de enfriamiento del equipo, pues la polimerización es una reacción exotérmica y en el proceso, esta ocurre a alta presión en un reactor autoclave el cual se considera adiabático debido al espesor de sus paredes; por lo anterior, existe un aumento en la temperatura del reactor. Además, al tener una menor temperatura, el flujo másico de gas que entra a los cilindros del compresor es mayor, aumentando así la conversión en el reactor.

El gas que entra a esta etapa es una mezcla de gas fresco de la unidad Etileno II y de gas proveniente del reactor debido a su bajo porcentaje de conversión, 15%. En inspecciones realizadas en los procesos de mantenimiento y limpieza previos se ha podido evidenciar el ensuciamiento que presentan estos intercambiadores, interfiriendo en el proceso de intercambio de calor, disminuyendo la eficiencia de los mismos, lo cual puede evidenciarse en el aumento de la temperatura de salida de estos.

### Figura 1

*Temperatura de salida del intercambiador E2253A*



*Nota:* Se evidencia el aumento de la temperatura de salida durante un periodo de 5 meses. Datos obtenidos de PI (Plant Information System).

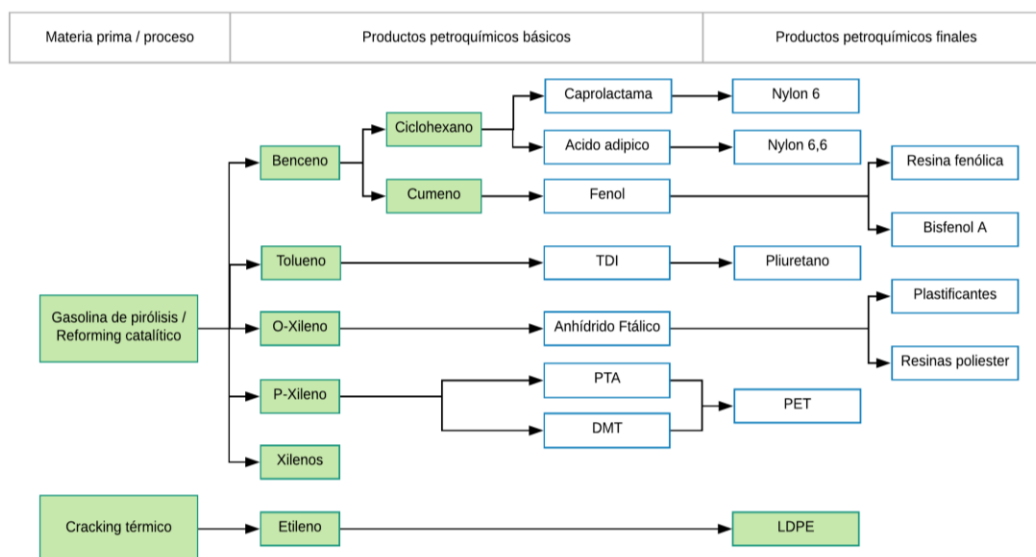
Actualmente en la refinería de Barrancabermeja se busca cuantificar la pérdida de eficiencia de estos intercambiadores y encontrar alternativas que permitan una producción sostenida en las

plantas durante su operación. Para esto se propone realizar una evaluación energética para determinar la eficiencia de estos equipos y así mantenerla o aumentarla, logrando disminuir la temperatura del gas etileno que entra al reactor, lo que favorece la conversión, además de brindar seguridad a la operación.

## **1. Marco Teórico**

### **1.1. Presentación de la empresa**

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande y la principal compañía petrolera de Colombia. Se encarga de la exploración, producción, refinación, transporte y comercialización del crudo, abasteciendo el mercado nacional de combustibles, y productos petroquímicos como disolventes, aromáticos, parafinas, polietileno, asfaltos y azufre. Actualmente cuenta con dos refinerías, Refinería de Barrancabermeja y Reficar en Cartagena (ECOPETROL S.A., 2014). La Refinería de Barrancabermeja se distribuye en más de cincuenta plantas y unidades de proceso, tratamientos, servicios y control ambiental. Entre las cuales se encuentran las unidades de proceso de productos petroquímicos, en la Figura 2 se muestran en verde los productos o procesos que se llevan a cabo en la GRB.

**Figura 2***Diagrama petroquímico GRB*

*Nota:* Adaptado de: (Chávez Prentt, 2018).

## 1.2. Descripción del proceso

El proceso de producción de polietileno está formado por operaciones unitarias que unidas logran la conversión del gas en el polímero, como se muestra en la Figura 3.

El etileno gaseoso proveniente de Etileno II con una presión de 200 psig y temperatura ambiente (92 °F a 110 °F), se mezcla con el gas de reciclo de baja presión del reactor R2251, esta corriente pasa al compresor primario C2252, el cual presiona el etileno y lo descarga con una presión de 3000 psig, la descarga del C2252 se mezcla con el gas de reciclo de media presión que no ha reaccionado. La corriente de gas mezclado se enfría en un tren de intercambiadores E2258A/B, E2257A/B, E2253A/B para ir a la succión del compresor secundario C2253, el cual tiene una descarga entre 16.500 y 19.500 psig en el reactor (ECOPETROL S.A., 2009, págs. 79-87).

La polimerización ocurre a una temperatura (350 a 515 °F) y presión (16.500 y 19.500 psig) estrictamente controladas. Al reactor también se alimentan iniciadores (peróxidos orgánicos diluidos en ciclohexano) en diferentes zonas, cima, medio y fondo, los cuales generan radicales libres, dando inicio a la reacción. Allí también se generan polímeros de bajo peso molecular como subproducto. La conversión del reactor es de 14 a 15%, por lo que el efluente es una mezcla entre polímero fundido y etileno gaseoso, estos son separados en dos etapas disminuyendo su presión, la primera en el SE2251 a 3.000 psig y la segunda en el SE2252 a 4 psig. El gas separado es recirculado a la zona de compresión, una parte es enviada a purificación en la planta de Etileno II y los polímeros de bajo peso molecular son separados en precipitadores (ECOPETROL S.A., 2009, págs. 87-96).

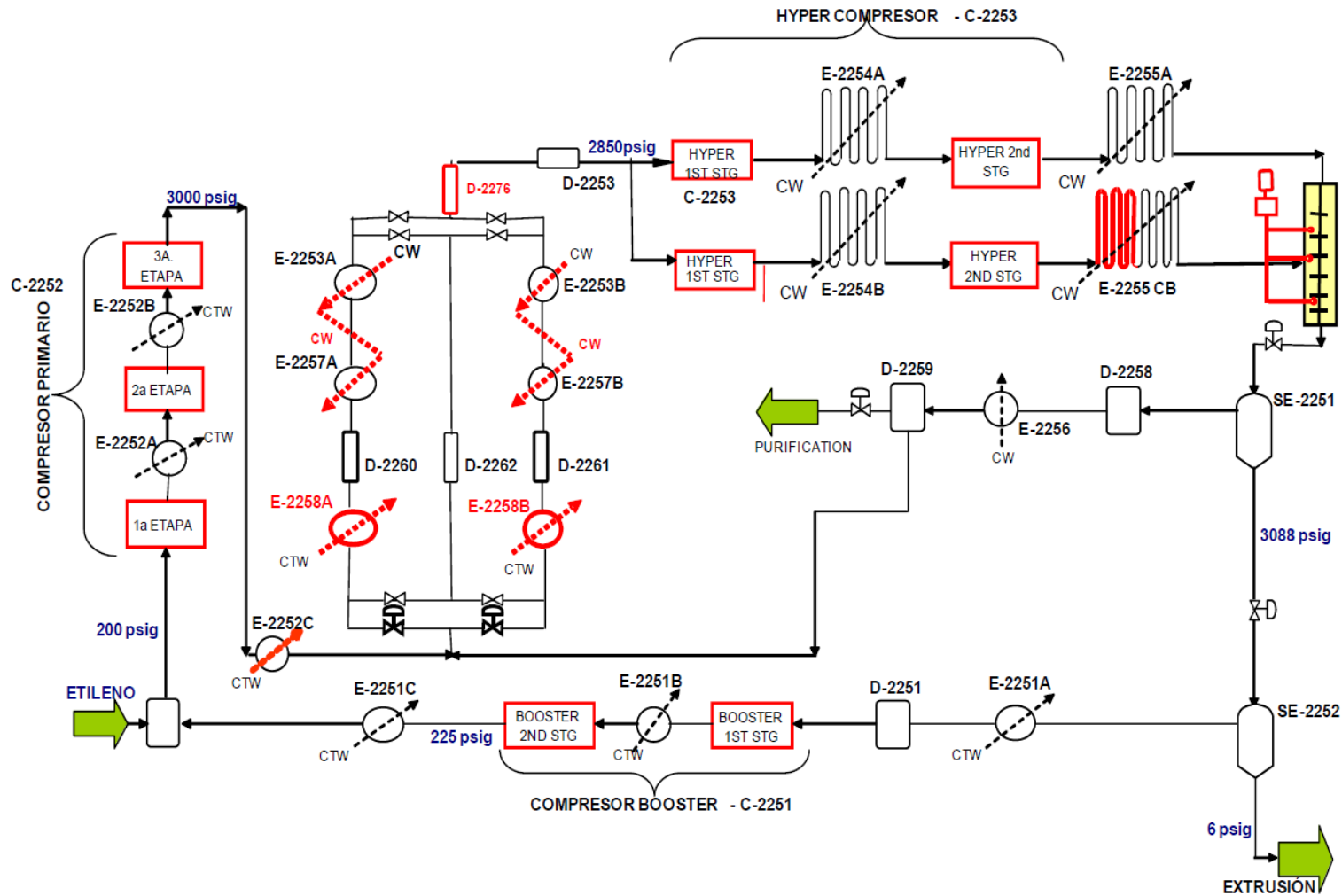
El polietileno fundido es dosificado con aditivos para brindarle propiedades adicionales y finalmente, pasa al extrusor EX2251 en donde es forzado a través de un tornillo hacia una platina perforada en donde se granula y solidifica al enfriarlo con agua, formando pellets, los cuales son secados, clasificados, pesados y transferidos por medio de aire a las tolvas en donde son retenidos o empacados para almacenar o despachar (ECOPETROL S.A., 2009, págs. 98-103).

### ***1.2.1. Intercambiadores del sistema de media presión***

El sistema de media presión contiene los intercambiadores E2256, E2258A/B, E2257A/B Y E2253A/B. Cuando el tren A se encuentra en operación, el tren B realiza una limpieza con gas a alta temperatura, mientras que el E2256 opera constantemente. Estos equipos intercambian calor con agua en diferentes condiciones, el E2256 trabaja con condensado, E2258A/B con agua industrial, E2257A/B con agua refrigerada efluente de E2253A/B.

Figura 3

Diagrama general de la unidad de Polietileno II



Nota: Tomado de (ECOPETROL S.A., 2009, pág. 74)

### 1.3. Polietileno

El polietileno (PE) es el polímero más simple, de color transparente, producido por la polimerización del etileno, frecuentemente es fabricado en láminas o pellets, de él pueden obtenerse productos con diferentes propiedades, pues es considerado una materia prima muy conveniente para la fabricación de diferentes artículos, debido a sus propiedades como bajo peso, flexibilidad, tenacidad, resistencia química, aislante térmico y eléctrico, entre otras (ECOPETROL S.A., 2009, pág. 168). En general existen dos tipos de polietileno, de baja densidad y de alta densidad. El polietileno de baja densidad (LDPE) es un polímero altamente ramificado, de baja dureza, pero con gran resistencia al impacto y elongación.

#### 1.3.1. Síntesis

El polietileno se obtiene mediante la polimerización de radicales libres del etileno. Cuando se crean estos radicales libres, el etileno se une mediante enlaces sencillos formando una cadena de miles de átomos de carbono (ECOPETROL S.A., 2009, pág. 123). Esta polimerización ocurre en tres etapas.

**1.3.1.1. Iniciación.** El proceso inicia con una molécula llamada iniciador, normalmente un peróxido, en este caso ter-butil-peroxipivalato (TPV) y ter-butil-peroxiacetato (TPA), caracterizadas por su reactividad química, estas se descomponen térmicamente generando un par de electrones como radicales libres, que al reaccionar con el etileno a alta temperatura, rompen el enlace doble, iniciando la reacción de polimerización (ECOPETROL S.A., 2009, pág. 124).

**1.3.1.2. Propagación.** En esta etapa se adicionan más moléculas del monómero a la cadena crecimiento. El etileno que queda con un electrón libre de la etapa anterior, reacciona de la misma manera con otra molécula de monómero propagando la reacción de polimerización por

adición. Las altas presiones favorecen la propagación de la reacción, por lo tanto, a presiones más altas, se obtienen polímeros de mayor peso molecular (ECOPETROL S.A., 2009, pág. 125).

**1.3.1.3. Terminación.** El crecimiento de la cadena puede terminarse de diferentes maneras. Una consiste en que se encuentren dos cadenas en crecimiento y sus dos átomos libres se unan formando un enlace, esta se conoce como acoplamiento. Otra forma es la desproporcionalización, cuando se encuentran dos cadenas en crecimiento, una de ellas le arrebató a la otra un átomo de hidrógeno, terminando su crecimiento y dejando a la otra con dos electrones desapareados. Los radicales de la cadena que perdió un hidrógeno, unen sus electrones desapareados formando un enlace doble en un extremo de la cadena (ECOPETROL S.A., 2009, págs. 125-127).

## **1.4. Energía**

La energía es la capacidad que posee un cuerpo para realizar un trabajo, esta puede presentarse en diferentes formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, nuclear. La suma de estos tipos de energía en un sistema representa la energía total y puede ser transferida entre sistemas en forma de calor o trabajo (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 51).

### **1.4.1. Transferencia de calor**

“El calor es la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas, o entre un sistema y el exterior, debido a una diferencia de temperatura” (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 60). Ocurre del sistema de mayor al de menor temperatura hasta alcanzar un equilibrio térmico, es decir hasta que ambos sistemas estén a la misma temperatura. Existen diferentes mecanismos de transferencia de calor.

**1.4.1.1. Conducción.** Ocurre cuando las partículas más energéticas de una sustancia transfieren energía hacia las menos energéticas al interactuar a través de un medio estacionario. Puede suceder en sólidos, líquidos y gases. “La razón de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura y al área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor de esta capa” (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 18).

**1.4.1.2. Convección.** Es el modo de transferencia de calor que ocurre “entre una superficie sólida y el líquido o gas alrededor que se encuentra en movimiento. Este mecanismo comprende efectos combinados de conducción y movimiento de fluidos” (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 25). A mayor velocidad en el fluido, mayor es la transferencia de calor. Se dice que la convección es forzada cuando el fluido es impulsado mediante medios externos y es natural o libre cuando el movimiento es causado por fuerzas de empuje inducidas por el cambio de densidad al variar la temperatura (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 26).

**1.4.1.3. Radiación.** “Es la energía transmitida por los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas” (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 27), no requiere la intervención de un medio. Este mecanismo es el más rápido, pues ocurre a la velocidad de la luz y no se atenúa con el vacío. La radiación térmica es emitida por cualquier cuerpo con una temperatura por encima del cero absoluto (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 27).

### **1.4.2. Transferencia de trabajo**

“El trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia” (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 62). Se reconoce como una interacción de energía que no se origina de una diferencia de temperatura.

### **1.4.3. Primera ley de la termodinámica**

Conocida como el principio de la conservación de la energía, establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, solo puede transformarse. El principio fundamental enuncia que “para todos los procesos adiabáticos entre dos estados de un sistema cerrado, el trabajo total realizado es el mismo sin importar la naturaleza del sistema ni los detalles del proceso” (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 70), es decir, el trabajo es igual al cambio de la energía total, sin importar cómo este ocurrió. La primera ley de la termodinámica se representa mediante la Ecuación 1.

$$\Delta(mh) + \frac{1}{2}\Delta(mv^2) + g \Delta(mz) + Q - W = \Delta(mU) \quad \text{Ecuación 1}$$

### **1.4.4. Segunda ley de la termodinámica**

Considera que los procesos ocurren en un solo sentido y que la energía tiene calidad, es decir, establece algunas condiciones para la primera ley (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 280), las cuales pueden definirse mediante los siguientes enunciados:

*Enunciado de Kelvin-Planck:* “Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo” (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 287).

*Enunciado de Clausius:* “Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura” (Cengel & Boles, Termodinámica, 2012, pág. 292).

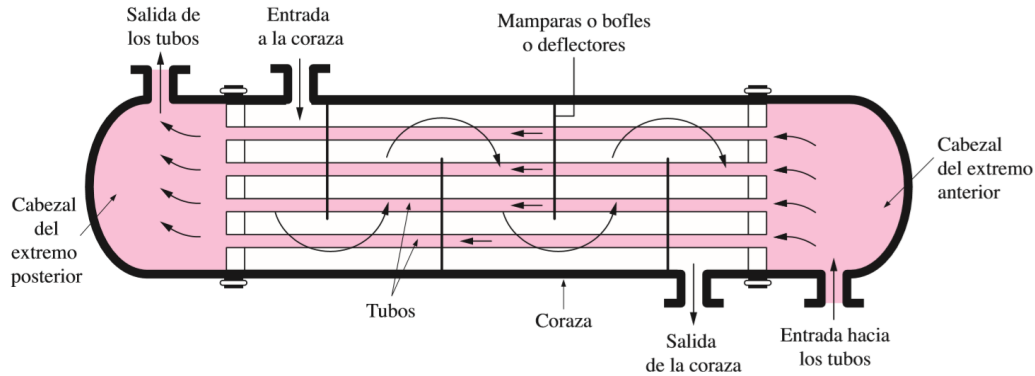
## 1.5. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son equipos que facilitan el intercambio de energía térmica entre dos fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas y evitan que se mezclen entre sí, es decir, la transferencia de calor ocurre mediante una pared que los separa. En ellos la transferencia comprende convección en cada uno de los fluidos y conducción en la pared (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 629). Según la primera ley de la termodinámica, el calor transferido entre los fluidos está dado por la Ecuación 2 (Jaramillo, 2007, pág. 15).

$$Q = m_c C_{p_c} \Delta T = m_f C_{p_f} \Delta T = C_c \Delta T = C_f \Delta T \quad \text{Ecuación 2}$$

### 1.5.1. Intercambiadores de calor de tubos y coraza

Consisten en una carcasa fija en la cual se encuentra un conjunto de tubos paralelos. Para mantenerlos fijos, se emplean placas, la cuales también cumplen la función de hacer circular los fluidos describiendo un movimiento ondulante como se representa en la Figura 4. Estos equipos se emplean cuando se requiere un área elevada de transferencia, son ampliamente utilizados debido a su capacidad y sus condiciones de operación. Estos intercambiadores se pueden clasificar según la cantidad de pasos de los fluidos por los tubos y la carcasa.

**Figura 4***Intercambiador de calor de tubos y coraza*

*Nota:* Tomado de (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 631)

### 1.5.2. Método de la eficiencia NTU de un intercambiador de calor

La eficiencia energética se define como “el consumo inteligente de la energía sin sacrificar seguridad ni producción, permitiendo mejorar la seguridad del suministro energético” (Amaro Quispe & Fernández Chuquirachi, 2015, pág. 38). También es definida como la comparación de la velocidad de transferencia térmica real con la velocidad de transferencia térmica máxima que podría transmitirse en un intercambiador de superficie infinita.

Para definir la eficiencia existe un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor que relaciona la razón de transferencia real con la razón de transferencia máxima como se muestra en la Ecuación 3 (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 652).

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\text{Razón de la transferencia de calor real}}{\text{Razón máxima posible de la transferencia de calor}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde la razón de transferencia de calor máxima se obtiene cuando el fluido frío se calienta hasta la temperatura de entrada del fluido caliente o el fluido caliente se enfría hasta la temperatura de entrada del fluido frío y se expresa en la Ecuación 4, en donde  $C_{min}$  es el menor entre  $C_c$  y  $C_f$  y  $\Delta T_{max}$  es la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido caliente y la temperatura de entrada del fluido frío (Cengel & Ghajar, Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones, 2011, pág. 652).

$$Q_{max} = C_{min} \Delta T_{max} \quad \text{Ecuación 4}$$

Kays y London presentaron una ecuación para calcular la eficiencia de un intercambiador tubo y coraza, utilizando un parámetro adimensional como se muestra en la Ecuación 5 (Amaro Quispe & Fernández Chuquirachi, 2015, pág. 40).

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C + \sqrt{1 + C^2} \frac{1 + e^{[-NTU\sqrt{1+C^2}]}}{1 - e^{[-NTU\sqrt{1+C^2}]}} \right\}^{-1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Esta cantidad adimensional se llama número de unidades de transferencia, NTU, por sus siglas en inglés y se expresa como (Amaro Quispe & Fernández Chuquirachi, 2015, pág. 40)

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}} \quad \text{Ecuación 6}$$

También resulta necesario definir otra cantidad adimensional, C, llamada relación de capacidades (Amaro Quispe & Fernández Chuquirachi, 2015, pág. 40).

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \text{Ecuación 7}$$

## 1.6. Simulación de procesos

Aristizabal plantea que “la simulación de procesos es la evaluación numérica de las condiciones específicas de un modelo, que ya ha pasado por el diseño de la ingeniería básica, con

ayuda de un software” (Cadavid Hernández, 2013, pág. 1). El simulador permite conocer variables o parámetros del proceso, calculados a partir de las variables conocidas ingresadas y sus bases de datos. También permite ahorrar tiempo, realizar análisis de la operación, optimizar procesos y complementar la toma de decisiones en momentos críticos de la operación.

### ***1.6.1. Simulador Aspen HYSYS***

Aspen HYSYS es un software especializado en la industria petroquímica que utiliza datos experimentales para las correlaciones. Se caracteriza por su interfaz amigable y su extensa base de datos de propiedades fisicoquímicas. Aspen Technology explica algunas características y funciones del simulador:

Aspen HYSYS es una herramienta de modelado y simulación de procesos para el diseño conceptual, optimización, planificación empresarial, gestión de activos y supervisión del rendimiento, procesamiento y refinación del petróleo y gas. Tiene una variedad de características y aplicaciones sectorizadas. Algunas de estas incluyen: herramientas para el modelado de procesos de hidrocarburos, modelos para simulaciones dinámicas y estacionarias, excelentes propiedades fisicoquímicas de diferentes componentes, equilibrios líquido vapor, y balances de materia y energía (Cadavid Hernández, 2013, pág. 7).

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia energética de los intercambiadores del sistema de media presión de la unidad de Polietileno II y su impacto en la producción y el desempeño de la planta.

### **2.2. Objetivos específicos**

2.2.1. Simular en Aspen Hysys v10 los intercambiadores de calor de la sección teniendo en cuenta los parámetros de diseño de estos equipos.

2.2.2. Relacionar la eficiencia energética de los equipos con las variaciones en la operación de la unidad, durante 4 años de operación.

2.2.3. Proponer una alternativa de mejora desde el análisis operacional para recuperar la producción de polietileno manteniendo una operación estable.

### 3. Alcance

La evaluación energética se realiza para conocer el comportamiento de la eficiencia de los enfriadores del sistema de media presión y si esto afecta la correcta operación de la unidad de Polietileno II. Para esto, se delimita la sección a trabajar, quedando como objeto de estudio los intercambiadores existentes desde la salida del separador de alta presión y la entrada del compresor Hyper, es decir el intercambiador E2256 y el tren de intercambiadores de media presión, formado por los intercambiadores E2258A/B, E2257A/B y E2253A/B. Debido a que los intercambiadores del tren A y el tren B son idénticos y se espera el mismo comportamiento de cada uno de los trenes de enfriamiento, se realiza el análisis solo para uno de ellos, en este caso el A, es decir los intercambiadores E2258A, E2257A y E2253A. Se realiza la simulación de estos en Aspen Hysys, con el fin de facilitar los cálculos para las eficiencias de cada equipo a través del tiempo.

Además, se analiza el comportamiento de la eficiencia de los equipos estudiados, los aumentos en las temperaturas de salida de los intercambiadores y se relacionan con las variables de operación y las intervenciones realizadas en la unidad. Este análisis se realiza con los datos del DCS registrados en el sistema PI, teniendo en cuenta la fecha de los mantenimientos de los equipos que son objeto de estudio.

Finalmente se proponen alternativas para mejorar la operación o aumentar la eficiencia de los equipos de la Unidad de Polietileno II.

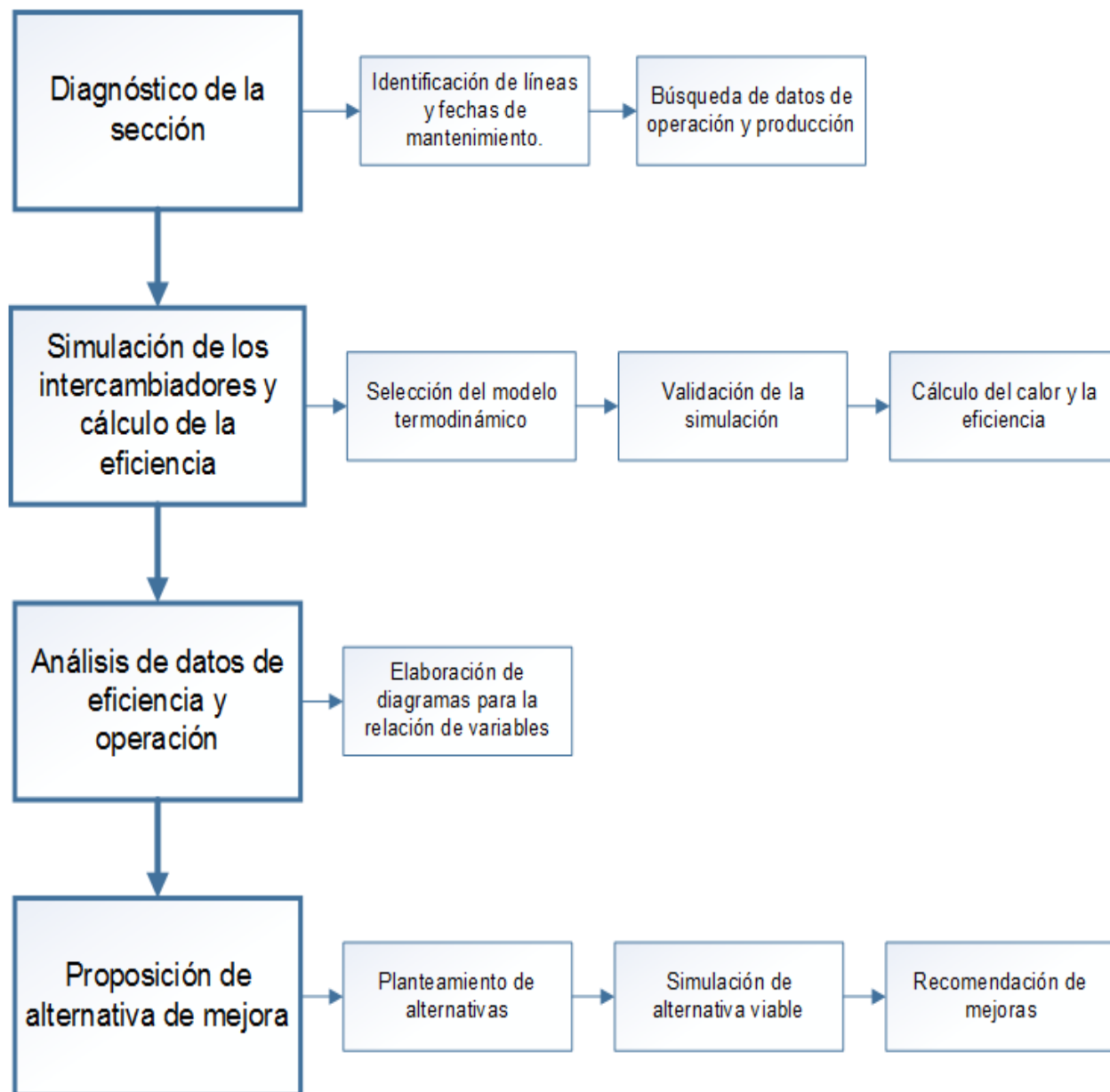
## 4. Metodología

Con el objetivo de evaluar la eficiencia de los intercambiadores del sistema de media presión de la planta de Polietileno II, se consideraron los efectos de los mantenimientos de dichos equipos, se estudió el impacto que tienen las variaciones de eficiencia en la operación de la planta y se propusieron algunas alternativas de mejora. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta las etapas de la metodología utilizada.

### 4.1. Diagnóstico de la sección

Se realizó una búsqueda de las fechas de mantenimiento de los intercambiadores desde las dos últimas paradas generales, entre las cuales se encontraron fechas de cambio de accesorios, compra de empaques, limpieza mecánica, limpieza química, inspecciones, instalaciones de ciegos, entre otras intervenciones que se realizan a dichos equipos. Estos datos fueron filtrados para obtener las fechas de limpiezas químicas y las mecánicas que se realizan en los mantenimientos generales.

La limpieza mecánica se realiza cada cuatro años, mientras que la limpieza química se realiza anualmente y cuenta con tres etapas en la cuales se hace circular una solución diferente en cada una (Zárate Melgarejo & Neira González, 2016, pág. 2). Esta limpieza es más superficial, por lo tanto, para el análisis se tuvieron en cuenta solamente las fechas de las dos últimas limpiezas mecánicas. Estas fechas dieron el intervalo de tiempo en el cual se va a estudiar el comportamiento de los intercambiadores.

**Figura 5***Diagrama metodológico*

*Nota:* Se representa de manera vertical las etapas principales y cada una contiene las sub etapas necesarias.

Luego, con el fin de identificar las líneas que llegan y salen de los intercambiadores, las uniones de corrientes y el funcionamiento de las válvulas, se elaboró un diagrama de la sección en

Microsoft Visio, también se identificaron los tags de los equipos de medición de temperatura existentes en las corrientes que entran y salen de los intercambiadores, además de los de algunas otras variables importantes para definir la operación de la planta y el funcionamiento del tren de enfriamiento. Con esta información se realizó la búsqueda en PI (Plant Information System) de los datos de cada una de las variables teniendo en cuenta el intervalo de tiempo establecido. Finalmente se recopilaron los datos de producción de la planta, los cuales se obtuvieron de RIS (Sistema de información de refinerías).

#### **4.2. Simulación de los intercambiadores y cálculo de la eficiencia**

Inicialmente se efectuó la búsqueda del DataSheet de cada intercambiador, de donde se extrajo información del proceso como los flujos de gas etileno y agua, temperaturas y presiones de entrada y salida de cada uno de los fluidos y caídas de presión por lado casco y lado tubos, también se consiguieron los datos de diseño de los intercambiadores como el tipo, número de tubos y su distribución, longitud, número de pasos, diámetros, entre otros.

La simulación de los intercambiadores se realizó el software Aspen HYSYS v10. La elección del modelo termodinámico influye en el correcto desarrollo de la simulación y en la veracidad de los datos que se obtienen de ella. En este caso las sustancias a utilizar son agua y gas etileno. Utilizando Methods Assistant de Aspen Hysys v10 se consiguen como resultado un modelo especial para lado casco y lado tubo de los intercambiadores. Igualmente, se mantuvo constantes los flujos que pasan por los intercambiadores y las presiones de las corrientes, pues no se cuenta con suficientes equipos de medición para los datos requeridos de estas variables. Para validar la simulación y comprobar que los valores obtenidos de ella son correctos, se compararon el calor de diseño registrado en el DataSheet de cada intercambiador y el valor obtenido de la simulación, esto se realizó para cada intercambiador.

Para el cálculo del calor máximo, se simularon las corrientes con la temperatura y presión de diseño y se obtuvo el calor específico de cada una, teniendo estos valores, se realizó el balance de energía de cada equipo, consiguiendo el calor transferido. Este valor se verificó con el calor de diseño, para finalmente con los datos del balance de energía, calcular el calor máximo.

Finalmente, los datos de las variables del proceso obtenidos en el diagnóstico de los equipos fueron filtrados para obtener solo aquellos en los que la planta se encontraba en operación y en los que el tren de enfriamiento utilizado fue el tren A. Con los datos obtenidos se realizaron los cálculos de calor y el factor UA, mediante la herramienta Workbook de Hysys que toma los valores dados de unas variables de entrada, en este caso las temperaturas y arroja valores para una variable de salida seleccionada. Teniendo estos valores se realiza el cálculo del NTU y posteriormente el de la eficiencia de cada equipo en el transcurso del tiempo, durante el intervalo establecido.

#### **4.3. Análisis de datos de eficiencia y operación**

Para observar el comportamiento de la eficiencia de los intercambiadores se realizó una gráfica en donde se relaciona la eficiencia con el tiempo de operación y se analiza su comportamiento. Por último, se realiza una gráfica de la producción en el mismo periodo de tiempo para verificar si existe relación directa entre la eficiencia y la producción.

#### **4.4. Proposición de alternativa de mejora**

Teniendo en cuenta el análisis anterior se propondrán algunas alternativas de mejora que optimicen el intercambio de calor, se analizará cuál o cuáles de estas alternativas son viables y se realizará una simulación en Aspen Hysys v10. Para terminar, se realizarán las respectivas recomendaciones para la optimización de este sistema.

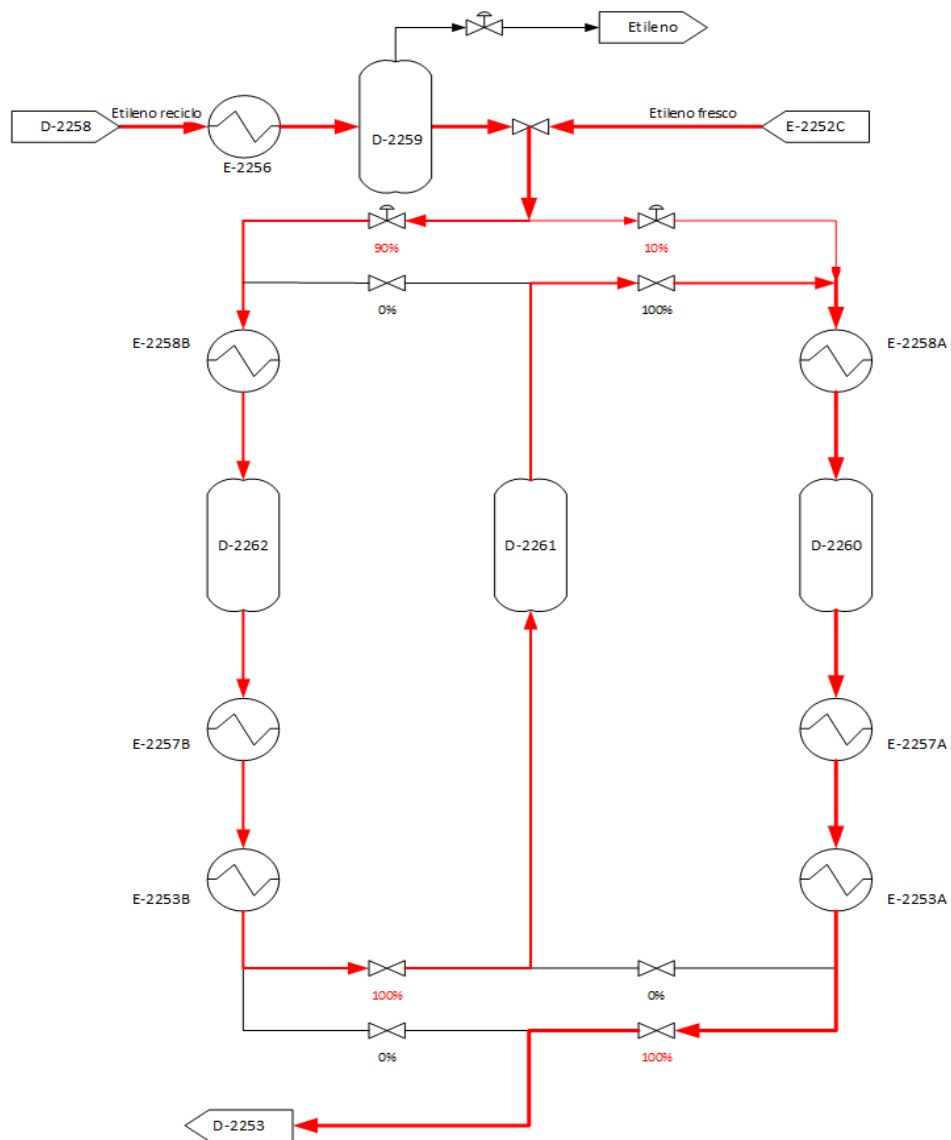
## 5. Resultados

### 5.1. Diagnóstico de la sección

Teniendo en cuenta que la limpieza mecánica es la más profunda, se realizó la búsqueda de la fecha de este procedimiento. Se encontró que fue realizada en el mantenimiento general de Polietileno II el 18 de mayo del 2018, conociendo esta fecha, se encuentra también que el mantenimiento general anterior fue el 5 de agosto del 2014. Para observar el comportamiento antes y después del mantenimiento, se decide ampliar el intervalo unos meses, por lo tanto, se establece el intervalo de estudio desde el 1 de enero de 2014 hasta el 30 de junio de 2019.

En el sistema de intercambiadores de calor también se efectúa una limpieza constante en caliente, es decir, mientras un tren realiza el enfriamiento del gas etileno, en el otro circula el gas a alta temperatura para remover el ensuciamiento que deja el proceso. Para saber cuál tren efectúa el enfriamiento, se debe tener en cuenta la apertura de las válvulas de entrada a este sistema. En la Figura 6 se muestra la apertura de las válvulas de entrada cuando el tren A se encuentra en funcionamiento y el recorrido que realiza el gas.

Además de la apertura de las válvulas y las temperaturas de las corrientes, existe una variable importante para el análisis, la presión del reactor, pues esta nos indica si la planta se encuentra en operación o no.

**Figura 6***Ruta del gas etileno*

En la Tabla 1, se muestran los tags de los equipos de medición de dichas variables, la descripción y su identificación en PI. Con el intervalo de tiempo establecido y los tags de los equipos, se realizó la búsqueda de los datos en PI, igualmente, se obtuvieron de RIS los datos de la producción. En el Apéndice A se muestran los datos diarios de la presión del reactor en psi, las temperaturas de entrada y salida de los intercambiadores en grados Fahrenheit y finalmente la

producción en toneladas. Estos son los datos que se van a utilizar para el análisis energético de los intercambiadores del tren A del sistema de media presión de la planta de Polietileno II.

**Tabla 1**

*Tags de los equipos*

| TAG      | DESCRIPCIÓN                        | TAG-PI                         |
|----------|------------------------------------|--------------------------------|
| PIC22551 | PRESION DEL REACTOR                | U2250-REACCION_II-PIC22551MEAS |
| TI22521  | TEMPERATURA ENTRADA E2256          | U2250-SEPARACIO_II-TI22521PNT  |
| TI22520  | TEMPERATURA SALIDA E2256           | U2250-SEPARACIO_II-TI22520PNT  |
| HIC22708 | APERTURA VALVULA ENTRADA TREN<br>A | U2250-COMPRESIO_II-ZI22708PNT  |
| HIC22709 | APERTURA VALVULA ENTRADA TREN<br>B | U2250-COMPRESIO_II-ZI22709PNT  |
| TI22707  | TEMPERATURA ENTRADA E2258A         | U2250-COMPRESIO_II-TI22707PNT  |
| TI22710  | TEMPERATURA ENTRADA E2257A         | U2250-COMPRESIO_II-TI22710PNT  |
| TI22557  | TEMPERATURA ENTRADA E2253A         | U2250-CARG_RECI_II-TI22557PNT  |
| TI22559  | TEMPERATURA SALIDA E2253A          | U2250-CARG_RECI_II-TI22559PNT  |

## 5.2. Simulación de los intercambiadores y cálculo de la eficiencia

La simulación del tren de intercambiadores requiere datos de diseño de dichos equipos, en el Apéndice B se muestran los datos necesarios de cada intercambiador. La selección del modelo es parte importante para obtener datos precisos, teniendo en cuenta las condiciones especiales de los fluidos. Mediante Methods Assistant de Aspen Hysys v10 se obtiene NBS Stream, método para sistemas especiales de un solo componente en los que se involucra solo agua, este método es

utilizado para el casco de los intercambiadores. Igualmente se obtiene un método para el lado tubos, MBWR, para sistemas que involucran hidrocarburos sin componentes hipotéticos, entre los cuales se encuentran algunos gases específicos como el etileno, a presiones menores de 5.802 psi.

Para verificar el correcto funcionamiento de la simulación, se compara el calor obtenido de esta con el de diseño. En la Tabla 2 se muestra el error relativo entre el calor de diseño y el calor obtenido de la simulación en cada uno de los intercambiadores. Se toma como aceptable un error menor del 10% (Santo & Lecumberry, 2005, págs. 15-16) por lo que se considera que la simulación es válida y arroja valores precisos. El error del E2258A es más alto debido a que este equipo está diseñado para trabajar con una eficiencia muy cercana a la ideal.

**Tabla 2**

*Validación de la simulación*

|                             | <b>E2256</b> | <b>E2258A</b> | <b>E2257A</b> | <b>E2253A</b> |
|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Calor de diseño [BTU/h]     | 9.828.000    | 7.418.931     | 2.141.000     | 517.300       |
| Calor de simulación [BTU/h] | 9.447.348    | 6.964.606     | 2.080.874     | 501.597       |
| Error [%]                   | 3,873%       | 6,124%        | 2,808%        | 3,036%        |

Para obtener del calor máximo se realizó el balance de energía de cada intercambiador y se efectuó el cálculo anterior, entre el calor de diseño y el obtenido mediante balance de energía, para verificarlo, los errores relativos se muestran en la Tabla 3 se puede evidenciar que todos los errores se encuentran dentro del rango permitido, por lo tanto se toma el balance de energía como base para el cálculo del calor máximo y con este, calcular eficiencia de diseño de cada equipo, estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.

**Tabla 3***Validación del balance de energía*

|                          | <b>E2256</b> | <b>E2258A</b> | <b>E2257A</b> | <b>E2253A</b> |
|--------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Calor de diseño [BTU/h]  | 9.828.000    | 7.418.931     | 2.141.000     | 517.300       |
| Calor de balance [BTU/h] | 9.913.275    | 6.788.427     | 2.083.234     | 502.284       |
| Error [%]                | 0,868%       | 8,499%        | 2,698%        | 2,903%        |

**Tabla 4***Calor máximo y eficiencia*

|                | <b>E2256</b> | <b>E2258A</b> | <b>E2257A</b> | <b>E2253A</b> |
|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Q max [BTU/h]  | 11.662.677   | 7.874.575     | 3.437.336     | 1.406.396     |
| Eficiencia [%] | 84,27%       | 94,21%        | 62,29%        | 36,78%        |

Con los datos obtenidos en el diagnóstico se pudo observar que la medición de la presión del reactor cambió el 26 de agosto del 2018 debido a una modificación en el lector, inicialmente se tiene que el dato de presión se debe multiplicar por 10 para obtener el valor real, por ejemplo, el 01 de enero de 2014 se muestra una lectura de 1.750,119, esto equivale a que la presión del reactor es de 17.501,19 psi. Lo anterior debe tenerse en cuenta para el análisis, pues una presión inferior a 15.000 significa que la planta no se encuentra en operación. Después de analizar la presión del reactor, se obtiene que la planta operó un 71,92% del tiempo durante los cinco años. El 28,08% restante equivale a los mantenimientos, limpiezas anuales, fallas en equipos críticos o de operación.

Luego de tener solamente los datos en los que la planta se encuentra en operación, se le realiza otro filtro para obtener los datos en los que opera el tren A intercambiando calor, para esto,

según el diseño, la válvula de apertura del tren A debe estar al 10% y la del tren B al 90%, al realizar este condicional se observa, por las temperaturas, que muchos datos en los que el tren A realiza intercambio de calor, quedan por fuera del análisis, por lo que se realiza un nuevo análisis en el que se decide tomar como condiciones: apertura del tren A = 30% y apertura de la válvula del tren B = 70%, las cuales incluyen los 638 datos a trabajar. Los valores obtenidos del análisis de datos se presentan en el Apéndice C.

Para obtener UA, se utilizan estos datos en la herramienta Workbook de Hysys que conecta Excel con la simulación realizada, los resultados para el cálculo de UA se muestran en el Apéndice D. Finalmente, se realiza el cálculo de los factores adimensionales NTU y C y mediante la Ecuación 5 se calcula la eficiencia diaria de cada intercambiador, estos resultados se observan en el Apéndice E.

### **5.3. Análisis de datos de eficiencia y operación**

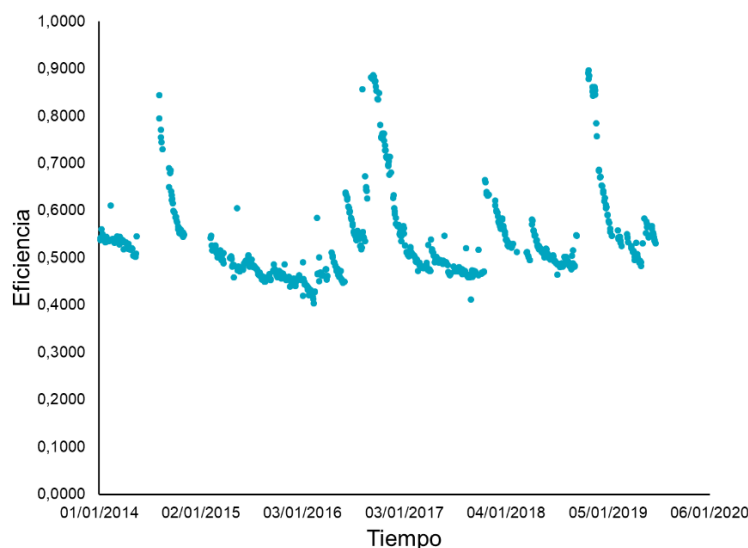
De acuerdo a la literatura, la eficiencia de un intercambiador de calor debe mantenerse entre el 60% y el 80% para que sea considerada buena (Imbert-González, 2011, pág. 309). La eficiencia promedio de los intercambiadores estudiados es 53,64% para el E2256, 63,56% en el E2258A, 36,82% en el E2257A y 23,16% en el E2253A estos valores son cercanos o menores al límite inferior del rango aceptable, por lo que se considera que estos equipos operan con una baja eficiencia debido al ensuciamiento de los tubos, pues el gas de reciclo proveniente del reactor trae consigo polímeros de cadena corta (grasa) que al sufrir el proceso de enfriamiento, se solidifica y se adhiere a la superficie de los tubos del intercambiador.

En la Figura 7 se muestran los resultados de la eficiencia del E2256 en el transcurso del tiempo, se observan 3 picos de eficiencia correspondientes a las limpiezas mecánicas realizadas al equipo. Para el 2.014 se tienen valores alrededor del 50% antes de realizar el mantenimiento y se

observa un aumento de la eficiencia de aproximadamente el 30%, obteniendo un valor máximo de 84%, el cual disminuye rápidamente alcanzando el 60%, valor mínimo del rango aceptable, en menos de dos meses. Para el 2.016 se tienen valores cercanos al 40%, los cuales aumentan significativamente, alcanzando casi 90% después del mantenimiento. Luego de esta intervención, la eficiencia disminuye y alcanza el 60% después de transcurridos 3 meses, lo que significa una mayor calidad durante el mantenimiento debida a una limpieza química realizada pocos meses antes, esto se traduce en una menor acumulación de grasa en el intercambiador. En el 2.018 se observa, en la eficiencia, un comportamiento similar a la limpieza mecánica anterior.

### Figura 7

#### *Eficiencia de E2256*

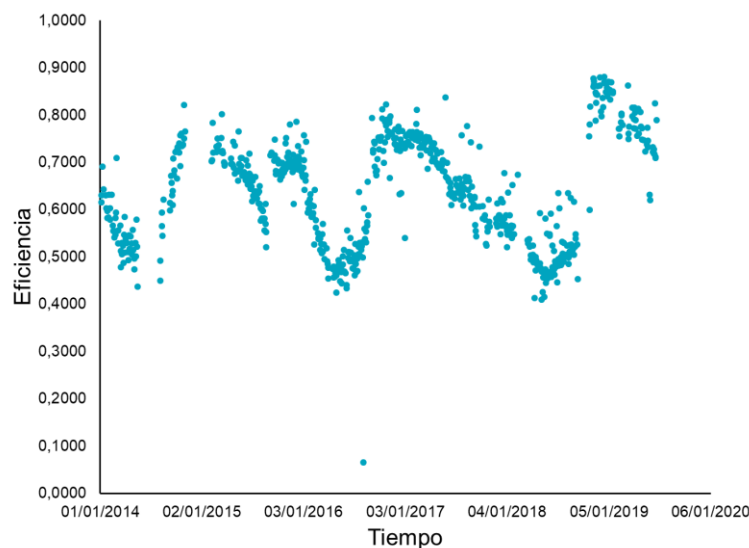


En los intercambiadores del tren A no se evidencian picos de eficiencia drásticos, debido a que estos equipos trabajan con su respaldo del tren B. El comportamiento de la eficiencia del intercambiador E2258A se observa en la Figura 8, este equipo realiza limpieza en caliente con etileno a una temperatura cercana a los 300 °F lo que se traduce en una mayor dilución de la grasa que luego es transportada y decantada en los drums que hacen parte del sistema. En este

intercambiador se evidencia que la eficiencia mantiene valores constantes y duraderos luego de la intervención del año 2.016, este mantenimiento tiene una mejor calidad debido a una menor acumulación de grasa. Los valores de eficiencia alcanzan el 60% después de 12 meses de funcionamiento para las intervenciones del 2.014 y 2.016, luego del mantenimiento del 2.018, la eficiencia alcanza valores mayores y sostenidos para los 6 meses siguientes.

### Figura 8

#### *Eficiencia E2258A*

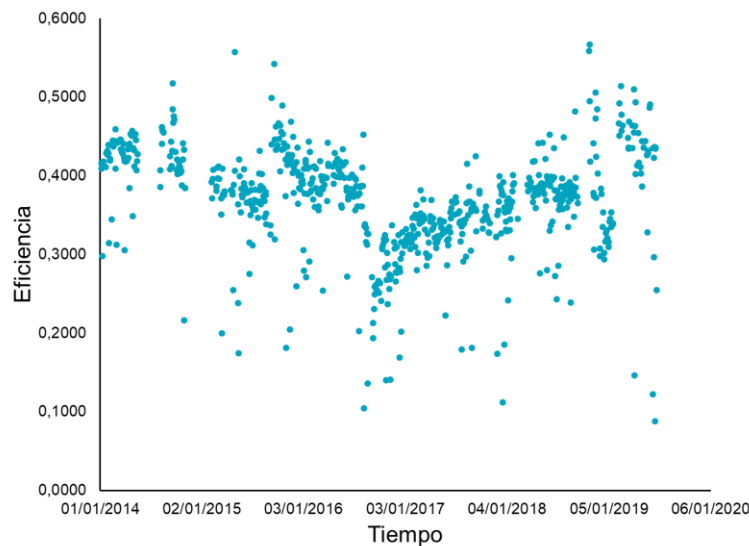


La Figura 9 presenta la eficiencia del E2257A en la que se evidencia un comportamiento general sin cambios drásticos pero con muchos datos atípicos, además se observan valores más bajos, entre 30% y 50%, pues a este intercambiador no entra ninguna corriente con temperatura constante, pues la temperatura del etileno varía según la eficiencia del intercambiador anterior y el agua ya ha realizado intercambio de calor en el E2253A, lo que a su vez causa que las temperaturas de entrada de los fluidos sean cercanas entre sí. Esto se observa particularmente en el 2.016, pues en este equipo no se realiza limpieza mecánica durante este año, pero al realizar mantenimiento en el E2258A, aumenta la eficiencia, disminuyendo la temperatura de salida de este, es decir la

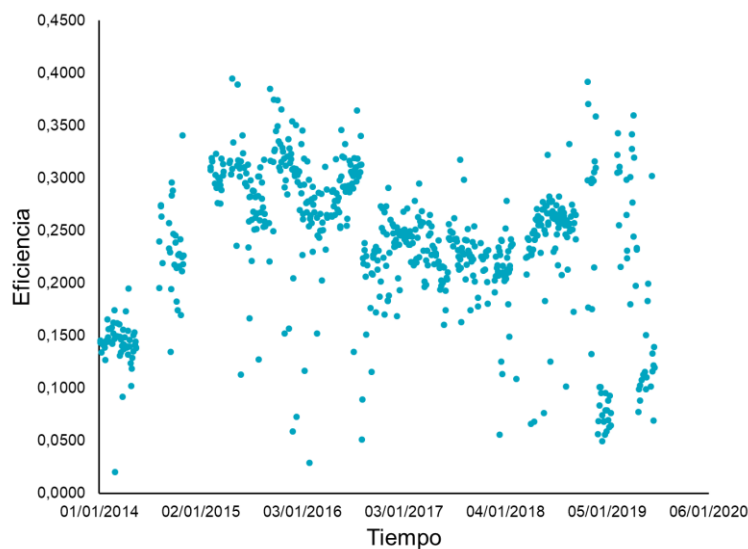
temperatura de entrada al E2257A, haciendo que esta sea cercana a la temperatura del agua proveniente del intercambiador E2253A, interfiriendo en la transferencia de calor.

### Figura 9

#### *Eficiencia E2257A*



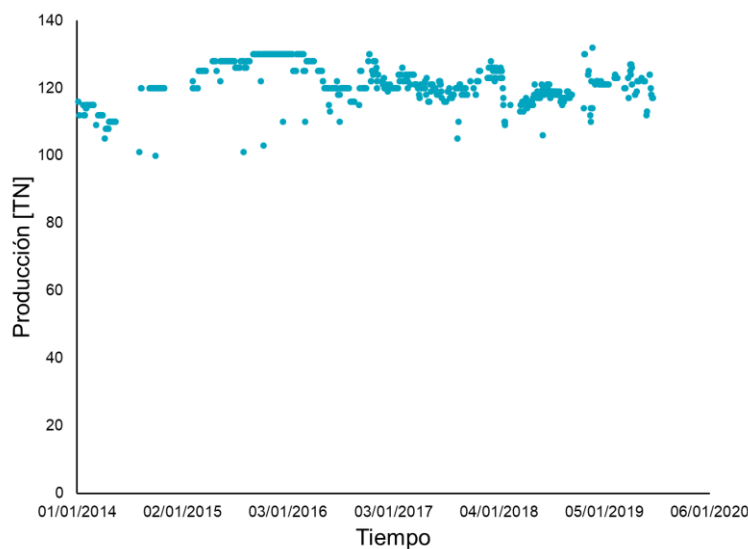
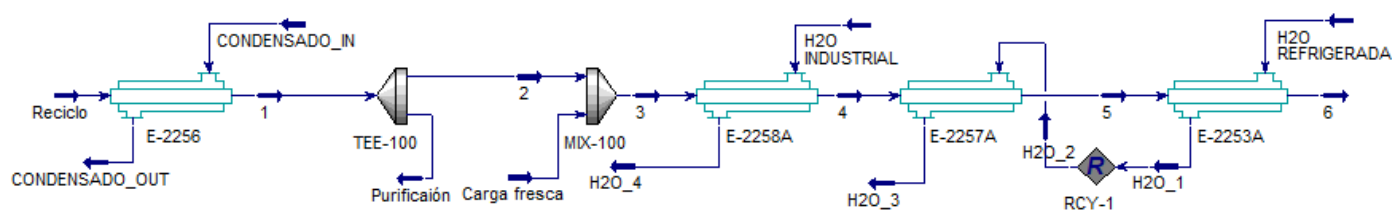
En el intercambiador E2253A, el agua que ingresa proviene de la ARU X2254 (unidad de refrigeración por absorción), la cual tiene una temperatura baja y constante, sin embargo, la eficiencia de este intercambiador se ve afectada por la variación del anterior, variando entre 10% y 35%. En la Figura 10 se evidencia un aumento en la eficiencia en el 2014, la cual disminuye hasta alcanzar un valor de aproximadamente 20% antes del mantenimiento del 2018, el cual es mayor que el alcanzado antes de la intervención en el 2014, esto indica mayor calidad en el mantenimiento. Después del 2018 no se evidencian mejoras significativas, además de obtener eficiencias muy bajas en el 2019 debido al funcionamiento de la ARU.

**Figura 10***Eficiencia E2253A*

La producción de la planta se ve afectada por la disminución de la eficiencia, pues al aumentar la temperatura del gas que sale del tren de intercambio de calor, se disminuye el flujo másico que entra a los cilindros del compresor Hyper. Esta disminución en la producción es de aproximadamente 5 a 10 tn/día y se puede evidenciar en la Figura 11.

#### **5.4. Proposición de alternativa de mejora**

La eficiencia de estos equipos puede disminuir debido a varios factores como impurezas o bajas velocidades en los fluidos, teniendo en cuenta el análisis, en donde se observó la disminución en la eficiencia, se proponen las algunas alternativas de mejora. Para verificar su funcionamiento se realiza una simulación en Aspen Hysys v10, como se muestra en la Figura 12, esta vez con la configuración rigurosa en los intercambiadores, también se realizó una modificación agregando la purga hacia etileno y la carga fresca proveniente de la misma unidad, esto con el fin de que la corriente principal de gas en el sistema tenga continuidad.

**Figura 11***Producción diaria***Figura 12***Simulación de los intercambiadores*

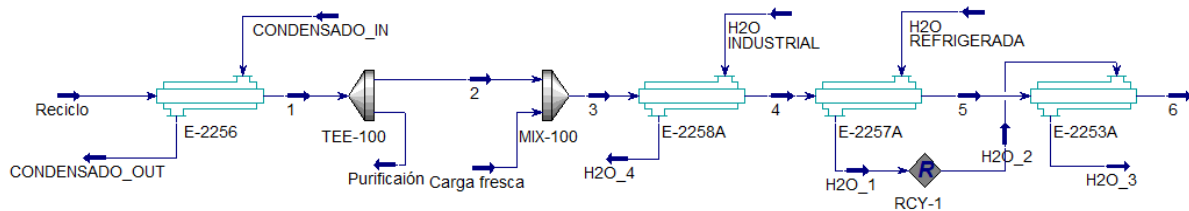
A continuación, se muestran las mejoras propuestas y finalmente sus resultados.

1. Colocar agua refrigerada proveniente de la ARU directamente a E2257A: se plantearon dos opciones, utilizar el caudal total directamente en el E2257A y el efluente circularlo al E2253A, Figura 13, o dividir el caudal original en estos dos intercambiadores, Figura 14, en esta última se realiza un caso de estudio para analizar la relación de flujo que minimiza la temperatura de salida del gas, obteniendo un 0,6 del flujo total para el E2257A. Esta alternativa se plantea debido a los datos atípicos que presenta la eficiencia de este intercambiador, al recibir agua de la ARU, una de

las dos corrientes de entrada tiene un valor constante, esto puede generar un comportamiento más estable a lo largo del tiempo.

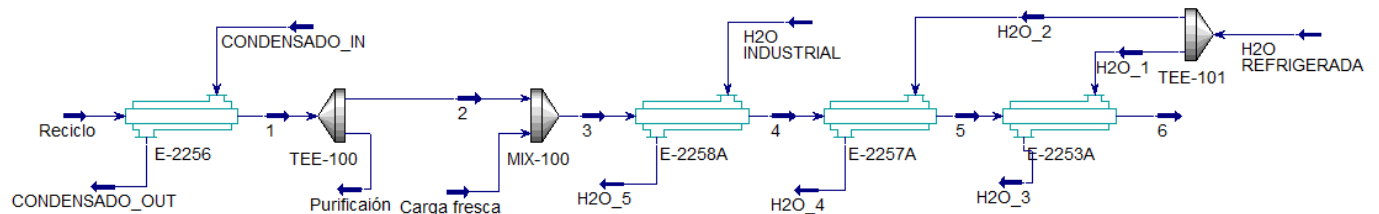
**Figura 13**

*Esquema de la Mejora 1.1*

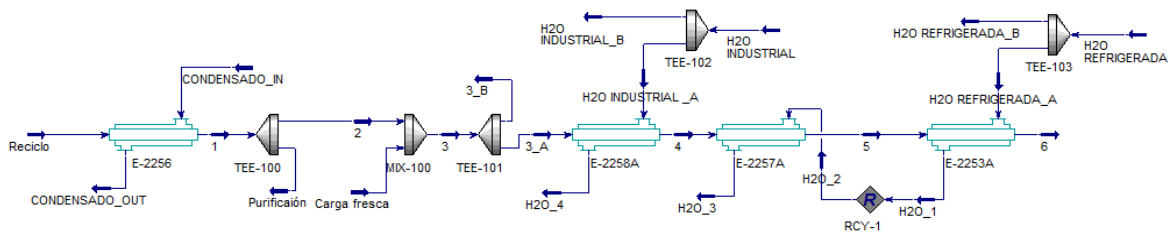


**Figura 14**

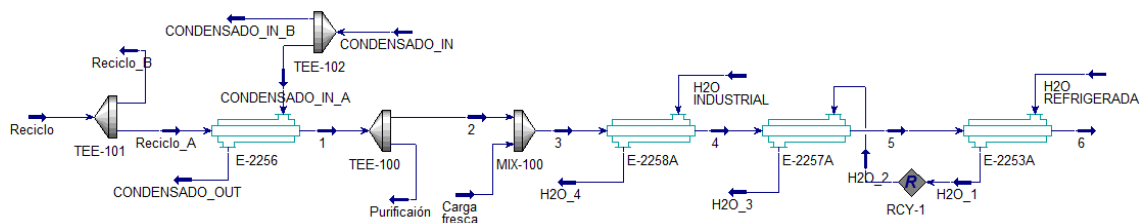
*Esquema de la Mejora 1.2*



2. Circular el 50% del gas por cada uno de los trenes: para esto debe dividirse como se muestra en la Figura 15, el flujo de gas y el flujo de agua, pues el tren B deberá enfriar el 50% restante del gas. Debe tenerse en cuenta que cuando trabaja un solo tren, el otro realiza una limpieza con gas a alta temperatura, el efecto de esta limpieza se perdería en este caso.

**Figura 15***Esquema de la Mejora 2*

3. Implementar un intercambiador que trabaje a dúo con el E2256, es decir, se tendría E2256A/B: este nuevo equipo podría trabajar en serie como lo hacen actualmente los E2258/57/53 A/B y realizar limpieza con el gas a 500 °F, pues el gas a esta temperatura realizaría una buena limpieza, lo que mejoraría el desempeño de este intercambiador. Además, al aumentar la capacidad para este intercambiador se disminuye la carga térmica de los E2258A/B para los cuales el mantenimiento es complicado y costoso debido al tipo de casco. También pueden trabajar con el 50% del flujo, Figura 16.

**Figura 16***Esquema de la Mejora 3*

Finalmente, en la Tabla 5 se muestra la temperatura de salida del gas del E2253A, se puede evidenciar una disminución en la temperatura con las mejoras 2 y 3, debido a la disminución de la carga de cada uno de los intercambiadores, es decir del flujo másico, aumentando entonces el caudal y la velocidad del fluido, generando un aumento en el coeficiente global de transferencia de

calor, mejorando el calor intercambiador y así, la eficiencia de los intercambiadores (Akpabio, Oboh, & Aluyor, 2009, pág. 697).

**Tabla 5**

*Resultados de las mejoras propuestas*

| CONFIGURACIÓN | TEMPERATURA DE SALIDA DEL |
|---------------|---------------------------|
|               | E2253A [°F]               |
| Actual        | 55,16                     |
| Mejora 1.1    | 58,92                     |
| Mejora 1.2    | 57,35                     |
| Mejora 2      | 46,68                     |
| Mejora 3      | 46,79                     |

## 6. Conclusiones

Al disminuir la temperatura del gas de reciclo, los polímeros de cadena corta se solidifican sobre las paredes del intercambiador generando ensuciamiento y aumentando la resistencia a la transferencia de calor, por esto se observa una pérdida de eficiencia de hasta de un 30% en los intercambiadores respecto a la eficiencia de diseño de cada uno. Esta disminución genera caída de un 8% en la producción diaria de la planta, lo cual representa pérdidas económicas entre 3.8 y 4.3 millones por tonelada y mala imagen de la empresa por incumplimiento a sus clientes.

También se observó que la limpieza química realizada no influye considerablemente en la eficiencia de los equipos, es por eso que se debe buscar un disolvente químico que mejore este

proceso y reemplace la limpieza mecánica, sin afectar su efectividad, pues esta última tiene altos costos y afecta la integridad de los equipos.

La simulación de los intercambiadores, en configuración rigurosa, arroja un valor de la temperatura de salida del tren de intercambiadores menor al valor del diseño, debido a que en la simulación circula gas etileno puro, es decir, no se tienen en cuenta los polímeros de cadena corta. Sin embargo, los resultados de las mejoras son comparados con el arrojado por esta simulación.

Finalmente, se consigue una mejor eficiencia de los intercambiadores con la propuesta 2, pues al disminuir el flujo másico, se incrementa la velocidad del fluido, aumentando la transferencia de calor. Aunque con esta mejora se elimina la limpieza con gas a alta temperatura, se debe tener en cuenta que, al hacer fluir menor cantidad de gas, también se disminuye la cantidad de polímeros de cadena corta (grasa), disminuyendo el ensuciamiento de los intercambiadores. Igualmente, la mejora 1.2 puede tener un buen resultado al aumentar el flujo de agua que circula por los intercambiadores, pues el conectar agua directamente al E2257A, se obtendría una menor variación de la eficiencia obteniendo un equipo más estable.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda cuidar la correcta apertura de las válvulas de control en la entrada de los preenfriadores, pues se encontraron valores hasta de 40% de apertura de la válvula del tren que se encuentra en funcionamiento, esto puede disminuir el flujo de gas a los intercambiadores que realizan la limpieza con gas a alta temperatura, disminuyendo así la eficiencia de este proceso.

Los tubos aletados y el multipaso por el lado casco, generan una mejora en la eficiencia de los intercambiadores, pues aumentan el área de transferencia y la velocidad del fluido,

respectivamente, aumentando así el coeficiente global de transferencia de calor, por lo anterior, puede estudiarse la posibilidad de implementar estas alternativas para los intercambiadores estudiados.

Así mismo, se puede plantear un procedimiento mediante el cual la grasa no se solidifique cuando la unidad salga de operación, facilitando la limpieza de los equipos. También, cambiar los insumos utilizados durante la fabricación del polietileno, reemplazándolos por unos con una menor generación de grasa.

Se sugiere realizar un análisis del comportamiento del ensuciamiento de los intercambiadores utilizando un modelo como Kern-Seaton o el modelo de Fryer-Slater, los cuales describen el aumento en el espesor de esta capa y la velocidad del ensuciamiento en función de la temperatura, respectivamente (Gómez Orozco & Capera Urrego, 2016, pág. 95). Igualmente se recomienda realizar un análisis a los polímeros de cadena corta (grasa) para obtener la resistencia que esta opone a la transferencia de calor y así obtener valores de eficiencia más cercanos a los reales.

### Referencias Bibliográficas

- Akpabio, E., Oboh, I., & Aluyor, E. (2009). The effect of baffles in shell and tube heat exchangers. *Advanced Materials Research*, 62-64, 694-699.  
doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.62-64.694>.
- Amaro Quispe, H., & Fernández Chuquirachi, G. (2015). Evaluación de la eficiencia energética de un intercambiador de calor tipo coraza y tubo en el laboratorio de operaciones y procesos unitarios de la FIQ-UNCP. *Tesis de grado*. Huancayo, Perú: Facultad de Ingeniería Química.
- Aristizabal, A. (2007). Introducción a las prácticas de diseño de procesos. *Clases de Hysys*. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.
- Cadavid Hernández, N. A. (2013). Incidencia de la selección del paquete termodinámico en la simulación para el diseño de procesos en la producción de formaldehído y estireno. *Tesis de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT*. Medellín.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (7 ed.). México D.F.: Mc-Graw Hill.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (4 ed.). México D.F.: Mc-Graw Hill.
- Chávez Prentt, A. F. (2018). *Producción de nuevas resinas en la planta de polietileno I/II de la Gerencia Refinería Barrancabermeja*. (Tesis de Maestría en Ingeniería Química), Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

ECOPETROL S.A. (2009). Manual de descripción de procesos de la unidad de Polietileno II. Barrancabermeja.

ECOPETROL S.A. (07 de Noviembre de 2014). *Lo que hacemos*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos>

Gómez Orozco, L., & Capera Urrego, A. (2016). Modelos de ensuciamiento en intercambiadores de calor tubulares en sistemas indirectos en procesos UHT en la industria láctea. *Revista Especializada en Ingeniería*, 10, 95. doi:10.22490/25394088.1590

Imbert-González, J. (2011). Evaluación de un intercambiador de calor. Estudio de su empleo como recuperador de calor. *31*(2), 302-312. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852011000300005&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000300005&lng=es&nrm=iso)

Jaramillo, O. A. (20 de Noviembre de 2007). *Intercambiadores de calor*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/HeatExchanger.html>

Padilla Cadena, E. J. (2019). *Determinación de las condiciones necesarias durante los procesos de preservación y purga que reducen la degradación termo-oxidativa de la resina de polietileno de baja densidad producida en las plantas de Ecopetrol S.S. Barrancabermeja Santander*. (Tesis de Maestría en Ingeniería Química), Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Sáenz V, J. (12 de Agosto de 2018). Grandes petroleras dan giro hacia la petroquímica. *El*

*Espectador*. Recuperado el 15 de Agosto de 2019, de El Espectador:

<https://www.elespectador.com/economia/grandes-petroleras-dan-giro-hacia-la-petroquimica-articulo-805787>

Santo, M., & Lecumberry, G. (2005). *El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales*. Río Cuarto, Argentina: Universidad Nacional de Río Cuarto.

Zárate Melgarejo, K. S., & Neira González, J. R. (24 de Agosto de 2016). Recomendación técnica para el mantenimiento mayor del sistema de enfriamiento gas Etileno 3000 psig. Barrancabermeja, Santander, Colombia: 6.

## Apéndices

## Apéndice A. Datos de PI y producción diaria 2.014 - 2.018 (Sección)

| FECHA      | PRESIÓN<br>REACTOR<br>[PSI] | T.<br>ENTRADA<br>E2256 [°F] | T. SALIDA<br>E2256 [°F] | APERTURA<br>VÁLVULA<br>TREN A [%] | APERTURA<br>VÁLVULA<br>TREN B [%] | PRODUCCIÓN<br>[TN] |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|            | PIC22551                    | TI22521                     | TI22520                 | HIC22708                          | HIC22709                          |                    |
| 01/01/2014 | 1750,12                     | 492,29                      | 344,44                  | 89,71                             | 9,96                              | 120                |
| 02/01/2014 | 1759,83                     | 491,53                      | 345,37                  | 69,73                             | 32,87                             | 119                |
| 03/01/2014 | 1755,31                     | 491,85                      | 344,33                  | 69,73                             | 32,88                             | 101                |
| 04/01/2014 | 1763,64                     | 486,70                      | 325,27                  | 50,53                             | 56,34                             | 115                |
| 05/01/2014 | 1760,03                     | 492,44                      | 342,71                  | 19,65                             | 90,02                             | 116                |
| 06/01/2014 | 1757,59                     | 493,42                      | 344,36                  | 19,67                             | 90,00                             | 98                 |
| 07/01/2014 | 1010,49                     | 270,48                      | 281,41                  | 69,72                             | 32,90                             | 94                 |
| 08/01/2014 | 1730,83                     | 491,60                      | 338,32                  | 69,71                             | 32,90                             | 110                |
| 09/01/2014 | 1735,61                     | 491,28                      | 337,38                  | 29,76                             | 75,86                             | 112                |
| 10/01/2014 | 1739,22                     | 492,53                      | 335,75                  | 43,81                             | 62,73                             | 111                |
| 11/01/2014 | 1727,82                     | 488,70                      | 341,57                  | 80,69                             | 21,47                             | 100                |
| 12/01/2014 | 1749,69                     | 492,52                      | 343,27                  | 80,67                             | 21,48                             | 113                |
| 13/01/2014 | 1744,29                     | 492,68                      | 340,56                  | 22,14                             | 88,39                             | 86                 |
| 14/01/2014 | 1000,00                     | 260,46                      | 310,64                  | 20,78                             | 90,05                             | 0                  |
| 15/01/2014 | 1000,00                     | 294,53                      | 336,94                  | 20,67                             | 90,05                             | 0                  |

|            |         |        |        |       |        |     |
|------------|---------|--------|--------|-------|--------|-----|
| 16/01/2014 | 1000,00 | 296,37 | 342,31 | 20,68 | 90,10  | 0   |
| 17/01/2014 | 1000,00 | 295,34 | 342,10 | 20,70 | 90,07  | 0   |
| 18/01/2014 | 1000,00 | 247,39 | 212,68 | 80,70 | 21,47  | 5   |
| 19/01/2014 | 1417,06 | 375,50 | 228,03 | 80,67 | 21,14  | 115 |
| 20/01/2014 | 1746,05 | 492,33 | 345,02 | 79,72 | 20,83  | 115 |
| 21/01/2014 | 1747,73 | 492,16 | 346,34 | 79,75 | 20,93  | 115 |
| 22/01/2014 | 1747,40 | 493,86 | 345,21 | 19,70 | 89,85  | 115 |
| 23/01/2014 | 1747,55 | 493,77 | 345,87 | 19,74 | 89,85  | 112 |
| 24/01/2014 | 1746,60 | 494,66 | 348,13 | 78,62 | 21,41  | 112 |
| 25/01/2014 | 1750,55 | 494,21 | 347,92 | 79,75 | 20,90  | 112 |
| 26/01/2014 | 1754,99 | 494,57 | 348,12 | 79,73 | 20,89  | 112 |
| 27/01/2014 | 1749,82 | 494,48 | 345,92 | 19,77 | 89,85  | 112 |
| 28/01/2014 | 1752,82 | 494,47 | 342,98 | 19,70 | 89,84  | 112 |
| 29/01/2014 | 1762,55 | 494,28 | 347,91 | 79,72 | 21,60  | 112 |
| 30/01/2014 | 1767,28 | 495,81 | 347,04 | 79,76 | 20,82  | 115 |
| 31/01/2014 | 1753,18 | 494,10 | 345,10 | 19,67 | 89,91  | 115 |
| 01/02/2014 | 1747,43 | 494,06 | 344,49 | 9,75  | 100,00 | 114 |
| 02/02/2014 | 1742,87 | 495,03 | 344,94 | 9,75  | 100,00 | 114 |
| 03/02/2014 | 1754,39 | 493,73 | 346,43 | 89,78 | 9,79   | 114 |
| 04/02/2014 | 1756,95 | 495,55 | 347,88 | 89,76 | 9,77   | 114 |
| 05/02/2014 | 1751,71 | 494,49 | 345,20 | 9,74  | 100,00 | 115 |
| 06/02/2014 | 1745,45 | 495,32 | 346,01 | 9,75  | 100,00 | 115 |

|            |         |        |        |       |        |     |
|------------|---------|--------|--------|-------|--------|-----|
| 07/02/2014 | 1760,22 | 494,18 | 348,55 | 79,74 | 21,29  | 115 |
| 08/02/2014 | 1761,91 | 496,89 | 349,33 | 79,75 | 21,21  | 115 |
| 09/02/2014 | 1759,86 | 495,28 | 347,88 | 79,75 | 21,22  | 10  |
| 10/02/2014 | 1000,00 | 284,41 | 304,32 | 9,95  | 100,00 | 38  |
| 11/02/2014 | 1728,24 | 485,43 | 321,95 | 9,71  | 100,00 | 96  |
| 12/02/2014 | 1191,77 | 296,36 | 245,18 | 9,71  | 100,00 | 115 |
| 13/02/2014 | 1745,15 | 492,14 | 342,61 | 52,37 | 51,91  | 115 |
| 14/02/2014 | 1753,96 | 493,24 | 343,85 | 89,77 | 9,81   | 115 |
| 15/02/2014 | 1752,60 | 495,49 | 346,29 | 89,76 | 9,85   | 115 |
| 16/02/2014 | 1745,73 | 493,41 | 344,31 | 9,68  | 100,00 | 115 |
| 17/02/2014 | 1737,64 | 492,91 | 343,50 | 9,75  | 100,00 | 115 |
| 18/02/2014 | 1742,87 | 492,95 | 345,79 | 88,80 | 10,79  | 115 |
| 19/02/2014 | 1760,41 | 494,71 | 346,85 | 89,79 | 9,81   | 115 |
| 20/02/2014 | 1754,68 | 495,09 | 347,46 | 89,78 | 9,77   | 115 |
| 21/02/2014 | 1742,82 | 495,35 | 345,85 | 9,72  | 100,00 | 115 |
| 22/02/2014 | 1771,61 | 494,57 | 344,40 | 9,75  | 100,00 | 115 |
| 23/02/2014 | 1764,64 | 494,52 | 346,96 | 89,78 | 9,79   | 115 |
| 24/02/2014 | 1760,24 | 495,12 | 347,40 | 89,79 | 9,78   | 115 |
| 25/02/2014 | 1760,96 | 495,91 | 347,18 | 9,68  | 100,00 | 115 |
| 26/02/2014 | 1752,09 | 496,52 | 346,86 | 9,71  | 100,00 | 115 |
| 27/02/2014 | 1749,55 | 494,56 | 344,69 | 9,74  | 100,00 | 115 |
| 28/02/2014 | 1745,93 | 494,62 | 347,74 | 89,79 | 9,86   | 115 |

|            |         |        |        |       |        |     |
|------------|---------|--------|--------|-------|--------|-----|
| 01/03/2014 | 1750,95 | 495,23 | 347,65 | 89,73 | 9,81   | 84  |
| 02/03/2014 | 1706,79 | 473,40 | 335,38 | 9,78  | 100,00 | 78  |
| 03/03/2014 | 1000,00 | 264,17 | 267,78 | 9,75  | 100,00 | 19  |
| 04/03/2014 | 1727,44 | 483,50 | 327,10 | 60,90 | 20,11  | 113 |
| 05/03/2014 | 1748,58 | 494,05 | 344,33 | 89,79 | 9,77   | 113 |
| 06/03/2014 | 1754,43 | 495,25 | 345,71 | 89,79 | 9,85   | 113 |
| 07/03/2014 | 1741,25 | 493,36 | 342,22 | 9,75  | 100,00 | 109 |
| 08/03/2014 | 1725,07 | 489,04 | 341,89 | 9,71  | 100,00 | 85  |
| 09/03/2014 | 1000,00 | 220,11 | 200,65 | 89,64 | 10,02  | 103 |
| 10/03/2014 | 1731,40 | 491,22 | 343,87 | 89,77 | 9,79   | 72  |
| 11/03/2014 | 1000,00 | 305,57 | 312,81 | 89,80 | 9,84   | 0   |
| 12/03/2014 | 1000,00 | 290,02 | 324,11 | 89,79 | 9,82   | 0   |
| 13/03/2014 | 1000,00 | 289,55 | 334,08 | 89,78 | 9,82   | 0   |
| 14/03/2014 | 1000,00 | 288,00 | 336,34 | 89,79 | 9,86   | 18  |
| 15/03/2014 | 1730,04 | 481,80 | 341,68 | 9,75  | 100,00 | 112 |
| 16/03/2014 | 1738,50 | 494,92 | 343,29 | 9,80  | 100,00 | 112 |
| 17/03/2014 | 1741,71 | 494,04 | 344,20 | 9,73  | 100,00 | 112 |
| 18/03/2014 | 1750,91 | 494,88 | 346,69 | 89,79 | 9,76   | 112 |
| 19/03/2014 | 1744,69 | 494,90 | 346,61 | 79,79 | 21,23  | 112 |
| 20/03/2014 | 1733,12 | 494,03 | 344,18 | 9,67  | 100,00 | 112 |
| 21/03/2014 | 1724,99 | 492,42 | 344,06 | 9,77  | 100,00 | 112 |
| 22/03/2014 | 1739,17 | 493,69 | 339,48 | 87,94 | 14,60  | 112 |

|            |         |        |        |       |        |     |
|------------|---------|--------|--------|-------|--------|-----|
| 23/03/2014 | 1749,67 | 494,47 | 346,49 | 89,75 | 9,82   | 76  |
| 24/03/2014 | 1741,28 | 494,32 | 346,25 | 51,40 | 53,03  | 112 |
| 25/03/2014 | 1738,45 | 494,35 | 345,13 | 9,75  | 100,00 | 112 |
| 26/03/2014 | 1733,99 | 491,40 | 343,58 | 9,72  | 100,00 | 112 |
| 27/03/2014 | 1735,65 | 492,29 | 346,36 | 88,86 | 11,12  | 112 |
| 28/03/2014 | 1751,25 | 494,71 | 348,66 | 79,79 | 21,26  | 112 |
| 29/03/2014 | 1742,23 | 493,89 | 345,99 | 9,75  | 99,95  | 112 |

**Apéndice B. Información de DataSheet de los intercambiadores**

|                                | E2256 |       | E2258A |         | E2257A |         | E2253A |         |
|--------------------------------|-------|-------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
|                                | Casco | Tubo  | Casco  | Tubo    | Casco  | Tubo    | Casco  | Tubo    |
| Flujo [lb/h]                   | 10200 | 57000 | 510400 | 75757,6 | 254178 | 75757,6 | 254178 | 75757,6 |
| Temperatura de entrada<br>[°F] | 220   | 520   | 90     | 235     | 44     | 110     | 42     | 70      |
| Temperatura de salida [°F]     | 240   | 265   | 104,5  | 110     | 52     | 70      | 44     | 60      |
| Presión de entrada [psi]       | 10    | 3150  | 60     | 2970    | 60     | 2965    | 60     | 2955    |
| Caída de presión [psi]         | 0,03  | 3,6   | 8,624  | 4,031   | 0,93   | 7,07    | 2,94   | 3,73    |
| Número de pasos                | 1     | 4     | 1      | 4       | 1      | 4       | 1      | 2       |
|                                |       |       |        |         |        |         |        |         |
| Tipo de intercambiador         | NKN   |       | NEN    |         | NEN    |         | NEN    |         |
| Número de tubos                | 354   |       | 540    |         | 489    |         | 228    |         |
| Diámetro externo tubos<br>[in] | 0,75  |       | 0,75   |         | 0,75   |         | 0,75   |         |
| Thk [BWG]                      | 10    |       | 10     |         | 10     |         | 10     |         |

|                               |           |            |           |           |
|-------------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Longitud de tubos [ft]        | 12        | 16         | 16        | 12        |
| Pitch [in]                    | 1         | 0,9675     | 1         | 0,9375    |
| Distribución de tubos         | 60        | 30         | 45        | 45        |
| Diámetro interno carcasa [in] | 21,25     | 26         | 27        | 19,25     |
| Tipo de Baffles               | Horiz-seg | Single-seg | Horiz-seg | Horiz-seg |
| Cut [%]                       | 20        | 21         | 25        | 25        |
| Spacing [in]                  | 10        | 12,4256    | 21,2      | 20,3      |

## Apéndice C. Datos de operación (Sección)

| FECHA          | PRESIÓN<br>REACTOR [PSI] | OPERACIÓN | T.<br>ENTRADA E2256<br>[°F] | T.<br>SALIDA E2256<br>[°F] | APERTURA<br>VÁLVULA TREN A<br>[%] | APERTURA<br>VÁLVULA TREN B<br>[%] | TREN<br>A<br>ENFRÍ<br>A |
|----------------|--------------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
|                | PIC22551                 |           | TI22521                     | TI22520                    | HIC22708                          | HIC22709                          |                         |
| 05/01/20<br>14 | 17.600,32                | SI        | 492,44                      | 342,71                     | 19,65                             | 90,02                             | SI                      |
| 06/01/20<br>14 | 17.575,92                | SI        | 493,42                      | 344,36                     | 19,67                             | 90,00                             | SI                      |
| 09/01/20<br>14 | 17.356,06                | SI        | 491,28                      | 337,38                     | 29,76                             | 75,86                             | SI                      |
| 13/01/20<br>14 | 17.442,92                | SI        | 492,68                      | 340,56                     | 22,14                             | 88,39                             | SI                      |
| 22/01/20<br>14 | 17.474,01                | SI        | 493,86                      | 345,21                     | 19,70                             | 89,85                             | SI                      |
| 23/01/20<br>14 | 17.475,46                | SI        | 493,77                      | 345,87                     | 19,74                             | 89,85                             | SI                      |
| 27/01/20<br>14 | 17.498,23                | SI        | 494,48                      | 345,92                     | 19,77                             | 89,85                             | SI                      |

|          |           |    |        |        |       |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|--------|--|----|
| 28/01/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.528,20 | SI | 494,47 | 342,98 | 19,70 | 89,84  |  | SI |
| 31/01/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.531,80 | SI | 494,10 | 345,10 | 19,67 | 89,91  |  | SI |
| 01/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.474,28 | SI | 494,06 | 344,49 | 9,75  | 100,00 |  | SI |
| 02/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.428,70 | SI | 495,03 | 344,94 | 9,75  | 100,00 |  | SI |
| 05/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.517,15 | SI | 494,49 | 345,20 | 9,74  | 100,00 |  | SI |
| 06/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.454,50 | SI | 495,32 | 346,01 | 9,75  | 100,00 |  | SI |
| 11/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.282,44 | SI | 485,43 | 321,95 | 9,71  | 100,00 |  | SI |
| 16/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.457,30 | SI | 493,41 | 344,31 | 9,68  | 100,00 |  | SI |
| 17/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.376,39 | SI | 492,91 | 343,50 | 9,75  | 100,00 |  | SI |
| 21/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.428,20 | SI | 495,35 | 345,85 | 9,72  | 100,00 |  | SI |
| 22/02/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.716,09 | SI | 494,57 | 344,40 | 9,75  | 100,00 |  | SI |

|          |           |    |        |        |      |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|------|--------|--|----|
| 25/02/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.609,63 | SI | 495,91 | 347,18 | 9,68 | 100,00 |  |    |
| 26/02/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.520,89 | SI | 496,52 | 346,86 | 9,71 | 100,00 |  |    |
| 27/02/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.495,48 | SI | 494,56 | 344,69 | 9,74 | 100,00 |  |    |
| 02/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.067,87 | SI | 473,40 | 335,38 | 9,78 | 100,00 |  |    |
| 07/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.412,55 | SI | 493,36 | 342,22 | 9,75 | 100,00 |  |    |
| 08/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.250,70 | SI | 489,04 | 341,89 | 9,71 | 100,00 |  |    |
| 15/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.300,36 | SI | 481,80 | 341,68 | 9,75 | 100,00 |  |    |
| 16/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.385,03 | SI | 494,92 | 343,29 | 9,80 | 100,00 |  |    |
| 17/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.417,14 | SI | 494,04 | 344,20 | 9,73 | 100,00 |  |    |
| 20/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.331,24 | SI | 494,03 | 344,18 | 9,67 | 100,00 |  |    |
| 21/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.249,85 | SI | 492,42 | 344,06 | 9,77 | 100,00 |  |    |

|          |           |    |        |        |      |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|------|--------|--|----|
| 25/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.384,52 | SI | 494,35 | 345,13 | 9,75 | 100,00 |  |    |
| 26/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.339,88 | SI | 491,40 | 343,58 | 9,72 | 100,00 |  |    |
| 29/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.422,34 | SI | 493,89 | 345,99 | 9,75 | 99,95  |  |    |
| 30/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.342,50 | SI | 493,47 | 345,10 | 9,77 | 100,00 |  |    |
| 31/03/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.380,57 | SI | 494,44 | 350,14 | 9,75 | 99,25  |  |    |
| 03/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.344,50 | SI | 492,23 | 344,98 | 9,74 | 99,79  |  |    |
| 07/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.348,94 | SI | 492,84 | 345,27 | 9,77 | 100,00 |  |    |
| 11/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.516,26 | SI | 494,85 | 347,57 | 9,71 | 100,00 |  |    |
| 12/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.434,33 | SI | 494,63 | 347,19 | 9,68 | 100,00 |  |    |
| 15/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.394,37 | SI | 495,05 | 349,97 | 9,68 | 100,00 |  |    |
| 16/04/20 |           |    |        |        |      |        |  | SI |
| 14       | 17.369,47 | SI | 494,34 | 348,92 | 9,71 | 100,00 |  |    |

|          |           |    |        |        |       |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|--------|--|----|
| 17/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.399,55 | SI | 495,10 | 347,35 | 9,72  | 100,00 |  |    |
| 20/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.468,80 | SI | 494,26 | 350,14 | 10,03 | 100,00 |  |    |
| 21/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.320,59 | SI | 494,52 | 349,16 | 9,77  | 100,00 |  |    |
| 25/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.434,91 | SI | 494,73 | 350,48 | 12,63 | 97,02  |  |    |
| 26/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.385,34 | SI | 494,56 | 350,08 | 9,70  | 100,00 |  |    |
| 29/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.516,85 | SI | 493,19 | 349,01 | 9,58  | 100,00 |  |    |
| 30/04/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.321,36 | SI | 494,25 | 349,58 | 9,75  | 100,00 |  |    |
| 04/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.377,96 | SI | 494,39 | 353,84 | 19,86 | 90,71  |  |    |
| 05/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.438,10 | SI | 492,67 | 352,80 | 10,83 | 97,60  |  |    |
| 09/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.430,01 | SI | 494,43 | 354,12 | 9,67  | 100,00 |  |    |
| 10/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.366,27 | SI | 494,02 | 353,56 | 9,70  | 100,00 |  |    |

|          |           |    |        |        |       |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|--------|--|----|
| 13/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.355,96 | SI | 494,29 | 354,44 | 19,67 | 89,71  |  | SI |
| 14/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.319,87 | SI | 493,20 | 352,18 | 19,67 | 89,74  |  | SI |
| 15/05/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.142,31 | SI | 467,50 | 331,16 | 19,68 | 89,77  |  | SI |
| 05/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.463,43 | SI | 490,75 | 262,84 | 4,70  | 100,00 |  | SI |
| 06/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 15.803,18 | SI | 435,65 | 265,84 | 26,48 | 76,95  |  | SI |
| 11/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.197,68 | SI | 504,53 | 284,79 | 19,77 | 89,82  |  | SI |
| 12/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.110,54 | SI | 503,71 | 288,79 | 18,62 | 90,95  |  | SI |
| 13/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.095,58 | SI | 502,81 | 291,53 | 9,71  | 100,00 |  | SI |
| 17/08/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.860,08 | SI | 500,86 | 295,06 | 19,83 | 89,87  |  | SI |
| 09/09/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.116,44 | SI | 502,99 | 306,61 | 19,72 | 89,85  |  | SI |
| 10/09/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.046,68 | SI | 502,70 | 317,39 | 19,70 | 89,85  |  | SI |

|          |           |    |        |        |       |       |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|-------|--|----|
| 14/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 17.931,66 | SI | 499,88 | 308,52 | 19,70 | 89,91 |  | SI |
| 15/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 17.899,22 | SI | 501,80 | 307,45 | 19,74 | 89,87 |  | SI |
| 18/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.087,27 | SI | 502,18 | 319,67 | 23,14 | 85,97 |  | SI |
| 19/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.115,55 | SI | 502,02 | 321,92 | 19,74 | 89,89 |  | SI |
| 20/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.085,44 | SI | 504,49 | 325,73 | 19,76 | 89,89 |  | SI |
| 21/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.147,49 | SI | 501,14 | 323,84 | 19,77 | 89,85 |  | SI |
| 24/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.155,75 | SI | 501,40 | 326,28 | 19,74 | 91,00 |  | SI |
| 25/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.120,03 | SI | 504,44 | 331,90 | 19,70 | 90,98 |  | SI |
| 29/09/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.112,79 | SI | 503,70 | 332,70 | 19,70 | 89,89 |  | SI |
| 03/10/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.271,34 | SI | 505,16 | 336,24 | 19,70 | 89,83 |  | SI |
| 04/10/20 |           |    |        |        |       |       |  | SI |
| 14       | 18.087,34 | SI | 503,88 | 335,28 | 19,70 | 89,85 |  | SI |

|          |           |    |        |        |       |        |  |    |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|--------|--|----|
| 07/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.207,22 | SI | 506,21 | 338,54 | 9,71  | 100,00 |  |    |
| 08/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.165,95 | SI | 505,67 | 339,26 | 9,66  | 100,00 |  |    |
| 12/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.115,97 | SI | 504,21 | 341,24 | 19,70 | 89,87  |  |    |
| 13/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.228,73 | SI | 505,87 | 343,42 | 19,70 | 89,88  |  |    |
| 16/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.136,07 | SI | 503,84 | 344,93 | 19,77 | 89,81  |  |    |
| 17/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.268,40 | SI | 502,74 | 341,43 | 19,77 | 89,78  |  |    |
| 21/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.081,74 | SI | 504,23 | 345,36 | 19,80 | 89,78  |  |    |
| 22/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 17.900,48 | SI | 502,98 | 342,54 | 19,77 | 89,81  |  |    |
| 26/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.230,37 | SI | 505,52 | 346,19 | 9,75  | 100,00 |  |    |
| 27/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.316,54 | SI | 504,94 | 346,42 | 9,74  | 100,00 |  |    |
| 29/10/20 |           |    |        |        |       |        |  | SI |
| 14       | 18.228,53 | SI | 505,53 | 347,72 | 19,78 | 89,80  |  |    |

|          |           |    |        |        |       |       |    |  |
|----------|-----------|----|--------|--------|-------|-------|----|--|
| 30/10/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 14       | 18.221,91 | SI | 505,35 | 345,18 | 19,77 | 89,78 | SI |  |
| 02/11/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 14       | 18.288,19 | SI | 504,03 | 345,83 | 19,74 | 89,85 | SI |  |
| 06/02/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 15       | 18.290,25 | SI | 504,38 | 348,00 | 19,70 | 89,80 | SI |  |
| 07/02/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 15       | 18.271,28 | SI | 507,10 | 347,85 | 19,69 | 89,86 | SI |  |
| 10/02/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 15       | 18.312,85 | SI | 503,16 | 351,94 | 23,87 | 88,98 | SI |  |
| 12/02/20 |           |    |        |        |       |       |    |  |
| 15       | 17.903,71 | SI | 499,16 | 352,81 | 20,68 | 90,95 | SI |  |

**Apéndice D. Resultados de Workbook (Sección)**

| Scenario | Active | Input  |  |  |  |  |  | Output  |  |  |  | Status |
|----------|--------|--|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--------|
|          |        | 1.Phase<br>-<br>Tempera<br>ture.Ove<br>rall.Over<br>all<br>F | 2.Phase<br>-<br>Temper<br>ature.Ov<br>erall.Ov<br>erall<br>F | 3.Phase<br>-<br>Temper<br>ature.Ov<br>erall.Ov<br>erall<br>F | 5.Phase<br>-<br>Temper<br>ature.Ov<br>erall.Ov<br>erall<br>F | 6.Phase<br>-<br>Tempera<br>ture.Ove<br>rall.Over<br>all<br>F | 7.Phase<br>-<br>Temper<br>ature.Ov<br>erall.Ov<br>erall<br>F | E-<br>2256.Ove<br>rall<br>UA.Overa<br>ll UA<br>Btu/F-hr | E-<br>2258A.O<br>verall<br>UA.Overa<br>ll UA<br>Btu/F-hr | E-<br>2257A.O<br>verall<br>UA.Overa<br>ll UA<br>Btu/F-hr | E-<br>2253A.O<br>verall<br>UA.Overa<br>ll UA<br>Btu/F-hr |        |
| Case 1   | *      | 520  | 265  | 235  | 110  | 70   | 60   | 74294,8   | 131862   | 54223,5  | 23209,7  | Ready  |
| Case 2   | *      | 492,44   | 342,71   | 247,27   | 149,79   | 108,03   | 99,07  | 30444,2   | 57514,1  | 29034,3  | 7850   | Ready  |
| Case 3   | *      | 493,42   | 344,36   | 249,83   | 153,10   | 109,40   | 100,14   | 30060,4   | 55058,9  | 29737,9  | 7965,73  | Ready  |
| Case 4   | *      | 491,28   | 337,38   | 232,35   | 135,69   | 109,21   | 100,69   | 32018,2   | 68664,1  | 19145,3  | 7299,48  | Ready  |
| Case 5   | *      | 492,68   | 340,56   | 239,46   | 145,12   | 104,15   | 95,79  | 31168,2   | 59580,3  | 29896,5  | 7732,44  | Ready  |
| Case 6   | *      | 493,86   | 345,21   | 250,46   | 151,10   | 108,61   | 99,88  | 29853,3   | 57356,6  | 29252  | 7560,67  | Ready  |
| Case 7   | *      | 493,77   | 345,87   | 250,90   | 155,56   | 109,39   | 101,32   | 29639,4   | 53044,3  | 31070,6  | 6864,78  | Ready  |

|         |   |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |       |
|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Case 8  | * | 494,48 | 345,92 | 251,27 | 156,57 | 109,85 | 100,54 | 29720,2 | 52222   | 31322,3 | 7960,8  | Ready |
| Case 9  | * | 494,47 | 342,98 | 248,17 | 157,84 | 111,15 | 101,79 | 30638,1 | 49869,5 | 30850,4 | 7861,64 | Ready |
| Case 10 | * | 494,10 | 345,10 | 247,93 | 154,64 | 107,89 | 97,59  | 29922,6 | 52821,4 | 32144,9 | 9164,76 | Ready |
| Case 11 | * | 494,06 | 344,49 | 249,16 | 158,04 | 111,14 | 101,62 | 30105,7 | 50059,1 | 30987,4 | 8004,39 | Ready |
| Case 12 | * | 495,03 | 344,94 | 226,11 | 141,88 | 112,31 | 102,49 | 30101   | 57593,1 | 20449,5 | 8136,65 | Ready |
| Case 13 | * | 494,49 | 345,20 | 251,57 | 155,91 | 110,64 | 100,53 | 29944   | 52962,9 | 30278,7 | 8611,27 | Ready |
| Case 14 | * | 495,32 | 346,01 | 251,31 | 159,63 | 113,15 | 103,50 | 29807,3 | 49408,5 | 30080,3 | 7888,88 | Ready |
| Case 15 | * | 485,43 | 321,95 | 216,17 | 138,05 | 106,70 | 97,08  | 36743,3 | 57685   | 23021,9 | 8658,11 | Ready |
| Case 16 | * | 493,41 | 344,31 | 248,56 | 160,52 | 110,83 | 100,60 | 30074,2 | 47595   | 32715,6 | 8703,22 | Ready |
| Case 17 | * | 492,91 | 343,50 | 248,73 | 162,37 | 112,78 | 103,32 | 30261   | 46055,3 | 31898,4 | 7764,21 | Ready |
| Case 18 | * | 495,35 | 345,85 | 249,11 | 162,45 | 112,12 | 101,39 | 29858,8 | 46121,7 | 32640,1 | 8997,42 | Ready |
| Case 19 | * | 494,57 | 344,40 | 248,60 | 164,38 | 113,24 | 103,05 | 30206,2 | 44300,5 | 32636,5 | 8372,32 | Ready |
| Case 20 | * | 495,91 | 347,18 | 241,46 | 154,94 | 111,54 | 100,11 | 29527,3 | 49999,4 | 29009,4 | 9734,73 | Ready |
| Case 21 | * | 496,52 | 346,86 | 249,42 | 163,94 | 111,08 | 101,50 | 29708,7 | 44970,5 | 34321,1 | 8065,46 | Ready |
| Case 22 | * | 494,56 | 344,69 | 225,34 | 146,71 | 102,07 | 100,88 | 30114,3 | 51621,4 | 32342,3 | 1043,39 | Ready |
| Case 23 | * | 473,40 | 335,38 | 238,06 | 134,73 | 107,25 | 98,05  | 30136,6 | 72611,6 | 20319,9 | 8173,62 | Ready |

|         |   |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |       |
|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Case 24 | * | 493,36 | 342,22 | 243,71 | 159,97 | 110,64 | 100,15 | 30728,1 | 46237,4 | 32607,3 | 8962,81 | Ready |
| Case 25 | * | 489,04 | 341,89 | 240,61 | 162,67 | 112,34 | 102,44 | 30233,8 | 42679,8 | 32496,1 | 8210,78 | Ready |
| Case 26 | * | 481,80 | 341,68 | 239,90 | 156,72 | 108,36 | 98,26  | 29279,4 | 47685,1 | 32880,8 | 8906,58 | Ready |
| Case 27 | * | 494,92 | 343,29 | 240,94 | 165,29 | 113,62 | 103,60 | 30602,2 | 40629,7 | 32770,7 | 8176,82 | Ready |
| Case 28 | * | 494,04 | 344,20 | 237,06 | 168,29 | 116,81 | 107,62 | 30195,4 | 36703,5 | 31517,1 | 7123,24 | Ready |
| Case 29 | * | 494,03 | 344,18 | 244,24 | 164,14 | 114,42 | 104,45 | 30200,5 | 42852,5 | 31448,2 | 8031,76 | Ready |
| Case 30 | * | 492,42 | 344,06 | 241,72 | 166,70 | 116,34 | 107,02 | 30016   | 39796,3 | 31091,9 | 7277,32 | Ready |
| Case 31 | * | 494,35 | 345,13 | 242,96 | 164,56 | 115,30 | 105,66 | 29946,7 | 42020,8 | 30875,6 | 7651,15 | Ready |
| Case 32 | * | 491,40 | 343,58 | 224,45 | 160,55 | 110,95 | 104,98 | 30028,3 | 37723,4 | 32266,6 | 4868,91 | Ready |
| Case 33 | * | 493,89 | 345,99 | 243,37 | 161,19 | 113,84 | 103,34 | 29618,7 | 45027,7 | 30390,8 | 8572,73 | Ready |
| Case 34 | * | 493,47 | 345,10 | 243,77 | 167,10 | 118,00 | 107,91 | 29837,2 | 40268,7 | 29966,2 | 7754,3  | Ready |
| Case 35 | * | 494,44 | 350,14 | 229,57 | 149,79 | 118,92 | 109,06 | 28435,8 | 50199,8 | 19739,9 | 7482,79 | Ready |
| Case 36 | * | 492,23 | 344,98 | 241,26 | 161,49 | 114,52 | 104,40 | 29702,8 | 43946,8 | 29935,8 | 8154,1  | Ready |
| Case 37 | * | 492,84 | 345,27 | 243,26 | 163,72 | 116,01 | 103,99 | 29696,6 | 42825,5 | 29993   | 9661,84 | Ready |
| Case 38 | * | 494,85 | 347,57 | 244,63 | 167,28 | 116,17 | 106,55 | 29264,7 | 40453,3 | 31566,3 | 7552,51 | Ready |
| Case 39 | * | 494,63 | 347,19 | 244,62 | 169,87 | 119,15 | 109,09 | 29350,6 | 38428,1 | 30446,3 | 7613,13 | Ready |

|         |   |        |        |        |        |        |        |         |         |         |         |       |
|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Case 40 | * | 495,05 | 349,97 | 244,86 | 162,08 | 112,35 | 102,13 | 28569,6 | 44836,8 | 32184,1 | 8505,86 | Ready |
| Case 41 | * | 494,34 | 348,92 | 243,25 | 165,63 | 114,32 | 105,36 | 28784,8 | 41254,5 | 32248,8 | 7169    | Ready |
| Case 42 | * | 495,10 | 347,35 | 243,14 | 166,15 | 121,84 | 107,34 | 29367,4 | 40788,3 | 26640,2 | 11018,7 | Ready |
| Case 43 | * | 494,26 | 350,14 | 243,99 | 161,91 | 110,60 | 101,15 | 28410,5 | 44643,6 | 33637,7 | 8000,69 | Ready |
| Case 44 | * | 494,52 | 349,16 | 243,40 | 166,97 | 115,88 | 106,20 | 28736,9 | 40231,8 | 31656,7 | 7634,28 | Ready |
| Case 45 | * | 494,73 | 350,48 | 242,32 | 163,51 | 111,69 | 103,57 | 28372,1 | 42643,2 | 33394,5 | 6686,74 | Ready |
| Case 46 | * | 494,56 | 350,08 | 242,21 | 167,11 | 112,96 | 106,13 | 28467,8 | 39657,6 | 34072,9 | 5454,72 | Ready |
| Case 47 | * | 493,19 | 349,01 | 241,93 | 159,01 | 120,69 | 112,00 | 28600   | 46399,8 | 23416,8 | 6381,01 | Ready |
| Case 48 | * | 494,25 | 349,58 | 243,86 | 166,26 | 115,33 | 106,46 | 28575,3 | 40973,5 | 31696,4 | 6990,12 | Ready |

## Apéndice E. Cálculo de eficiencia (Sección)

| FECHA         | CALOR<br>[BTU/h] | UA<br>[BTU/F<br>h] | NTU    | $\epsilon$ |
|---------------|------------------|--------------------|--------|------------|
| <b>Q max</b>  | 11.662.676,66    |                    |        | 1,0000     |
| <b>Diseño</b> | 9.828.000        |                    |        | 0,8427     |
| 05/01/2014    | 5.462.674,62     | 30444,18           | 0,7831 | 0,5424     |
| 06/01/2014    | 5.437.895,08     | 30060,4            | 0,7732 | 0,5379     |
| 09/01/2014    | 5.618.189,59     | 32018,16           | 0,8236 | 0,5605     |
| 13/01/2014    | 5.551.572,24     | 31168,22           | 0,8017 | 0,5508     |
| 22/01/2014    | 5.422.107,21     | 29853,27           | 0,7679 | 0,5354     |
| 23/01/2014    | 5.394.789,39     | 29639,4            | 0,7624 | 0,5329     |
| 27/01/2014    | 5.419.013,76     | 29720,23           | 0,7645 | 0,5339     |
| 28/01/2014    | 5.527.559,66     | 30638,11           | 0,7881 | 0,5447     |
| 31/01/2014    | 5.435.371,18     | 29922,62           | 0,7697 | 0,5363     |
| 01/02/2014    | 5.456.295,07     | 30105,66           | 0,7744 | 0,5384     |
| 02/02/2014    | 5.475.706,03     | 30101,04           | 0,7743 | 0,5384     |
| 05/02/2014    | 5.445.978,92     | 29943,99           | 0,7703 | 0,5365     |
| 06/02/2014    | 5.446.419,81     | 29807,28           | 0,7667 | 0,5349     |
| 11/02/2014    | 5.980.379,71     | 36743,31           | 0,9452 | 0,6106     |
| 16/02/2014    | 5.439.321,36     | 30074,22           | 0,7736 | 0,5381     |
| 17/02/2014    | 5.450.881,80     | 30260,97           | 0,7784 | 0,5403     |

|            |              |          |        |        |
|------------|--------------|----------|--------|--------|
| 21/02/2014 | 5.453.235,35 | 29858,81 | 0,7681 | 0,5355 |
| 22/02/2014 | 5.478.694,38 | 30206,21 | 0,7770 | 0,5396 |
| 25/02/2014 | 5.424.754,43 | 29527,28 | 0,7595 | 0,5315 |
| 26/02/2014 | 5.459.137,09 | 29708,69 | 0,7642 | 0,5337 |
| 27/02/2014 | 5.467.625,32 | 30114,35 | 0,7746 | 0,5385 |
| 02/03/2014 | 5.036.334,04 | 30136,62 | 0,7752 | 0,5388 |
| 07/03/2014 | 5.514.967,42 | 30728,12 | 0,7904 | 0,5457 |
| 08/03/2014 | 5.368.145,28 | 30233,83 | 0,7777 | 0,5400 |
| 15/03/2014 | 5.110.311,24 | 29279,37 | 0,7532 | 0,5286 |
| 16/03/2014 | 5.532.545,88 | 30602,2  | 0,7872 | 0,5443 |
| 17/03/2014 | 5.466.544,00 | 30195,44 | 0,7767 | 0,5395 |
| 20/03/2014 | 5.466.842,48 | 30200,5  | 0,7769 | 0,5396 |
| 21/03/2014 | 5.412.086,70 | 30015,95 | 0,7721 | 0,5374 |
| 25/03/2014 | 5.443.421,56 | 29946,68 | 0,7703 | 0,5366 |
| 26/03/2014 | 5.392.700,46 | 30028,35 | 0,7724 | 0,5375 |
| 29/03/2014 | 5.394.740,85 | 29618,73 | 0,7619 | 0,5326 |
| 30/03/2014 | 5.412.360,86 | 29837,25 | 0,7675 | 0,5353 |
| 31/03/2014 | 5.261.608,40 | 28435,8  | 0,7315 | 0,5183 |
| 03/04/2014 | 5.370.985,04 | 29702,76 | 0,7640 | 0,5337 |
| 07/04/2014 | 5.382.770,82 | 29696,57 | 0,7639 | 0,5336 |
| 11/04/2014 | 5.371.441,58 | 29264,66 | 0,7528 | 0,5284 |
| 12/04/2014 | 5.377.376,51 | 29350,61 | 0,7550 | 0,5294 |

|            |              |          |        |        |
|------------|--------------|----------|--------|--------|
| 15/04/2014 | 5.290.280,62 | 28569,63 | 0,7349 | 0,5199 |
| 16/04/2014 | 5.302.607,27 | 28784,79 | 0,7404 | 0,5225 |
| 17/04/2014 | 5.389.044,29 | 29367,42 | 0,7554 | 0,5296 |
| 20/04/2014 | 5.254.777,11 | 28410,45 | 0,7308 | 0,5179 |
| 21/04/2014 | 5.300.206,03 | 28736,85 | 0,7392 | 0,5220 |
| 25/04/2014 | 5.259.406,50 | 28372,12 | 0,7298 | 0,5175 |
| 26/04/2014 | 5.267.801,79 | 28467,84 | 0,7323 | 0,5186 |
| 29/04/2014 | 5.256.935,97 | 28599,96 | 0,7357 | 0,5203 |
| 30/04/2014 | 5.274.943,19 | 28575,31 | 0,7350 | 0,5200 |
| 04/05/2014 | 5.122.906,31 | 27341,4  | 0,7033 | 0,5045 |
| 05/05/2014 | 5.097.800,05 | 27404,82 | 0,7049 | 0,5053 |
| 09/05/2014 | 5.113.622,30 | 27263,1  | 0,7013 | 0,5035 |
| 10/05/2014 | 5.119.443,92 | 27370,57 | 0,7041 | 0,5049 |
| 13/05/2014 | 5.096.933,58 | 27153,18 | 0,6985 | 0,5021 |
| 14/05/2014 | 5.140.260,96 | 27660,67 | 0,7115 | 0,5086 |
| 15/05/2014 | 4.978.270,84 | 30724,87 | 0,7903 | 0,5457 |
| 05/08/2014 | 8.453.419,18 | 72682,74 | 1,8696 | 0,8444 |
| 06/08/2014 | 6.319.369,96 | 61888,13 | 1,5920 | 0,7952 |
| 11/08/2014 | 8.100.139,76 | 57465,88 | 1,4782 | 0,7708 |
| 12/08/2014 | 7.915.260,75 | 54938,75 | 1,4132 | 0,7555 |
| 13/08/2014 | 7.776.403,38 | 53242,62 | 1,3696 | 0,7447 |
| 17/08/2014 | 7.568.787,84 | 51047,55 | 1,3131 | 0,7299 |

|            |              |          |        |        |
|------------|--------------|----------|--------|--------|
| 09/09/2014 | 7.206.084,17 | 45598,85 | 1,1729 | 0,6896 |
| 10/09/2014 | 6.787.176,42 | 40900,93 | 1,0521 | 0,6499 |
| 14/09/2014 | 7.018.816,72 | 44318,81 | 1,1400 | 0,6793 |
| 15/09/2014 | 7.130.328,82 | 45055,7  | 1,1590 | 0,6852 |
| 18/09/2014 | 6.682.322,46 | 39919,54 | 1,0269 | 0,6410 |
| 19/09/2014 | 6.591.558,35 | 39016,37 | 1,0036 | 0,6326 |
| 20/09/2014 | 6.539.825,78 | 37899,52 | 0,9749 | 0,6220 |
| 21/09/2014 | 6.487.191,28 | 38165,4  | 0,9817 | 0,6246 |
| 24/09/2014 | 6.405.560,97 | 37287,44 | 0,9591 | 0,6160 |
| 25/09/2014 | 6.307.109,67 | 35665,97 | 0,9174 | 0,5997 |
| 29/09/2014 | 6.249.999,49 | 35290,6  | 0,9078 | 0,5959 |
| 03/10/2014 | 6.171.905,36 | 34273,86 | 0,8816 | 0,5852 |
| 04/10/2014 | 6.160.286,35 | 34426,99 | 0,8856 | 0,5868 |
| 07/10/2014 | 6.125.073,16 | 33647,12 | 0,8655 | 0,5785 |
| 08/10/2014 | 6.078.455,29 | 33339,31 | 0,8576 | 0,5752 |
| 12/10/2014 | 5.950.988,13 | 32504,62 | 0,8361 | 0,5660 |
| 13/10/2014 | 5.931.459,66 | 32031,62 | 0,8240 | 0,5607 |
| 16/10/2014 | 5.800.288,12 | 31288,14 | 0,8048 | 0,5522 |
| 17/10/2014 | 5.889.539,96 | 32247,81 | 0,8295 | 0,5631 |
| 21/10/2014 | 5.798.735,00 | 31206,87 | 0,8027 | 0,5513 |
| 22/10/2014 | 5.857.594,07 | 31928,07 | 0,8213 | 0,5595 |
| 26/10/2014 | 5.815.705,47 | 31121,74 | 0,8005 | 0,5503 |

|            |              |          |        |        |
|------------|--------------|----------|--------|--------|
| 27/10/2014 | 5.785.846,36 | 30974,02 | 0,7967 | 0,5486 |
| 29/10/2014 | 5.759.542,25 | 30656,13 | 0,7886 | 0,5449 |
| 30/10/2014 | 5.846.868,21 | 31411,66 | 0,8080 | 0,5536 |
| 02/11/2014 | 5.774.250,34 | 31036,08 | 0,7983 | 0,5493 |
| 06/02/2015 | 5.706.685,95 | 30417,61 | 0,7824 | 0,5421 |
| 07/02/2015 | 5.812.662,90 | 30823,37 | 0,7929 | 0,5469 |
| 10/02/2015 | 5.516.116,54 | 29081,15 | 0,7481 | 0,5262 |