

# 76

Fecha de presentación: Septiembre, 2021

Fecha de aceptación: Noviembre, 2021

Fecha de publicación: Diciembre, 2021

## ANÁLISIS Y DISEÑO

DE LA RED DE INTERCAMBIADORES DE CALOR EN UNA REFINERÍA DE PETRÓLEO

### HEAT EXCHANGER NETWORK ANALYSIS AND DESIGN IN A CRUDE OIL REFINERY

Mijaíl Bonachea Crespo<sup>1</sup>

E-mail: [mijail@refssp.cupet.cu](mailto:mijail@refssp.cupet.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-909X>

Juan Pedro Hernández Touse<sup>2</sup>

E-mail: [juanpedro@uclv.edu.cu](mailto:juanpedro@uclv.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>

Omar Pérez Navarro<sup>2</sup>

E-mail: [opnavarro@uclv.cu](mailto:opnavarro@uclv.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>

<sup>1</sup> Refinería de Petróleo Sergio Soto. Cabaiguán. Cuba.

<sup>2</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Bonachea Crespo, M., & Hernández Touse, J. P., & Pérez Navarro, O. (2021). Análisis y diseño de la red de intercambiadores de calor en una refinería de petróleo. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(S3), 584-591.

#### RESUMEN

El trabajo explora el uso de la energía y oportunidades para la recuperación del calor en el tren de precalentamiento de crudo, la unidad de destilación atmosférica y la unidad de destilación atmosférica en una refinería de petróleo. El objetivo es determinar los indicadores de desempeño energético y el potencial de energía recuperable mediante el análisis energético y la integración de calor. Se aplica el método de Análisis del Pellizco con uso de Aspen Energy Analyzer. El análisis energético hizo posible la definición de los consumos específicos de energía, vapor y agua de enfriamiento para la evaluación sistemática del desempeño energético. El diseño de la red de intercambiadores de calor satisface el 60 % de la máxima recuperación de la energía y se logra 7 % de ahorro de la energía. Los ahorros de combustible y agua permiten evaluar proyectos de inversión para la recuperación de la energía.

**Palabras clave:** Análisis del Pellizco, recuperación de calor, tren de precalentamiento, destilación.

#### ABSTRACT

Current research explores energy use and opportunities for heat recovery in the crude preheating train, atmospheric distillation unit, and vacuum distillation unit at an oil refinery. This study aims to determine energy performance indicators and recoverable energy potential through energy analysis and Heat Integration. The Pinch Analysis method is applied using Aspen Energy Analyzer. The energy analysis made it possible to define the specific consumptions of energy, steam and cooling water for systematic assessment of energy performance. Heat Exchanger Network design satisfies 60% of maximum energy recovery and 7% energy savings are achieved. The fuel and water savings allow assessing investment projects for improved energy recovery.

**Keywords:** Pinch Analysis, heat recovery, crude preheat train, distillation

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se examinan los procesos de destilación atmosférica de crudo y de destilación a vacío, como parte inicial de una evaluación del uso de la energía en una refinería de petróleo cubano.

Hay varios enfoques para el diseño de redes de intercambiadores de calor de procesos químicos que permiten reducir los consumos de energía. La integración de procesos es el método más común para reducir el consumo de energía en la industria de procesos (Smith, 2016).

Ulyev et al. (2018) afirma que el Análisis del Pellizco, debido a su simplicidad se usa ampliamente para determinar el consumo de energía, diseñar la red de intercambio de calor e identificar las oportunidades para la integración de procesos.

El uso del método del Pellizco permite recibir sustanciales ingresos financieros al minimizar el consumo de energía para contabilización de la maximización de la recuperación de calor dentro del sistema energético – tecnológico considerado (Ulyev, et al., 2018).

La integración de calor se ha establecido durante las últimas décadas como una metodología de ingeniería química probada. En la industria se utilizan a menudo dos implementaciones de diseño: nueva red de intercambiadores de calor y modernización (Nemet et al., 2015).

Aunque se han desarrollado varios métodos para la modernización de redes de intercambio de calor, aún necesita mayor desarrollo para asegurar simultáneamente la factibilidad termodinámica y económica (Nemet et al., 2015).

Hay muchas fuerzas impulsoras para los refinadores de petróleo para continuar mejorando la eficiencia energética y reducir las emisiones. El análisis para modificaciones se puede realizar después de obtener una descripción confiable del proceso. En la refinación de petróleo los diseños para modificaciones son menos comunes que las aplicaciones en nuevas redes de intercambio de calor. El problema de modificaciones apunta generalmente a desatascar producción, disminuir el uso de la energía y compensar para cambios en materias primas, productos u otras especificaciones del proceso.

Las unidades de crudo y vacío contabilizan el 60 % del uso total de la energía en la refinería, pero solo el 30% de los ahorros potenciales de energía. Las unidades de crudo tienen una única corriente fría dominante y muchas corrientes calientes a diferentes niveles de temperaturas, lo que hace relativamente fácil combinar propiamente las

corrientes sin la Tecnología del Pellizco (Querzoli, et al., 2003).

Por ejemplo, la recuperación de calor mejorada en una unidad puede conducir típicamente a los ahorros de combustible en los hornos de proceso y una correspondiente pérdida de producción de vapor en los enfriadores. Alternativamente, esto puede conducir a los ahorros de vapor en los calentadores de vapor, y una correspondiente reducción del uso del servicio frío (Marton, et al., 2017).

La literatura muestra la universalidad y amplia distribución del método de Análisis del Pellizco, tan bien como su efectividad en varias áreas de la industria, la cual asegura transparencia de los resultados obtenidos. Sin embargo, en realidad, no siempre es posible implementar un diseño nuevo de la red de intercambio de calor. Esto es especialmente verdad para la refinación del petróleo, donde la red inicial de intercambio térmico tiene un área alta de transferencia de calor y el espacio para un nuevo intercambiador es limitado (Ulyev, 20018). Si bien el análisis de pellizco ha demostrado ser una herramienta extremadamente poderosa, la mayoría de la guía se aplica en la región del Pellizco en sí y para problemas grandes, como el tren de precalentamiento de la refinería, hay poca orientación lejos de la región de Pellizco. Esta situación se vuelve exagerada en el caso de la modernización, donde el análisis de Pellizco ha demostrado tener limitaciones muy significativas (Smith, 2016).

Los datos juegan un papel importante cuando se describe/analiza el estado real en la planta dado que las condiciones de operación varían siempre y las mediciones siempre incorporan algunas imprecisiones. (Nemet et al., 2015).

Es una novedad la identificación del potencial actual para la recuperación del calor y la definición de propuestas de modernización de la red de intercambio de calor en la única planta que refina petróleo cubano pesado sin violaciones termodinámicas. El objetivo es determinar los indicadores de desempeño energético y el potencial de energía recuperable del proceso de fraccionamiento de petróleo mediante el análisis energético y la integración de calor.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación del uso de la energía en la unidad de destilación de crudo (UDC) y unidad de destilación a vacío (UDV) se sustenta en la implementación de las actividades de la revisión energética según la norma cubana (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 2019). Las principales actividades realizadas en la revisión energética fueron: (1) análisis del uso y consumo de la energía,

(2) determinación del desempeño energético actual y (3) identificación de oportunidades para mejorar el desempeño energético. Para el análisis del uso de la energía se aplican metodologías del balance de materiales y energía e incluye la determinación de los indicadores de desempeño energético (IDÉns). La integración de calor incluye el análisis y diseño de la red de intercambiadores de calor (RIC) El método de Análisis del Pellizco (Smith, 2016) se utiliza para determinar las demandas de servicios mínimos de calentamiento y enfriamiento, la energía máxima recuperable y el diseño de la red de intercambiadores de calor. En el procesamiento de los datos que requiere el análisis del pellizco se usa Aspen Energy Analyzer (Aspen Technology Inc., 2017).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La refinería tiene tres calderas, cuyas capacidades de generación de vapor son 4,5t/h, 6,5 t/h y 10 ton/h. En el actual esquema de generación operan dos calderas (17 t/h) las cuales consumen fuel oil y generan vapor saturado a 10 kgf/cm<sup>2</sup> y 180 °C. La planta procesa 1000 t/d de petróleo cubano con 14 °API, 8 % de azufre y 400 ppm de sales totales y opera 250 d/a. Los balances de materiales y energía se aplicaron en las unidades de precalentamiento de crudo y de destilación. La planta de aceites básicos, la planta de tratamiento de residuales y los sistemas de tuberías calentadas con vapor, no se consideran en este estudio. Se ha identificado que una de las causas de uso excedente de energía es el cruce de temperatura. En la Tabla 1 se muestran las demandas a de vapor y agua de enfriamiento y los consumos específicos de energía (CEE), vapor (CEV) y agua de enfriamiento (CEAE).

Tabla 1. Resultados del análisis del uso de la energía.

<b>Demandas</b>	<b>kJ/h</b>	<b>t/h</b>	<b>C.E.E. kJ/t crudo</b>	<b>C.E.V. t vapor/t crudo</b>	<b>C.E.A.E m3 agua/t crudo</b>
Vapor	10 441 440	5,2	10 441	0,12	
Agua de enfriamiento	3 122 400	37,3	3 122		0,9

En la Figura 2 se muestra el diagrama simplificado del proceso de refinación de crudo y de destilación a vacío y en la Tabla 2 los datos de las corrientes.

Las corrientes consideradas en el análisis son: agua (C1), petróleo crudo (C2), mezcla de fuel oil R2/R3 (C3), asfalto (C4), crudo(C5) a intercambiador con reflujo tope de torre a vacío, crudo a horno (C6), crudo reducido (C7), crudo a intercambio con queroseno (C8), crudo a intercambio con diesel (C9), crudo a intercambio con asfalto (C10), crudo a intercambio con diesel de destilación atmosférica (C11), crudo a intercambio con fuel oil R3 (C12), crudo a intercambio con asfalto R1 (C13), crudo(C14) a intercambio con fuel oil R2, crudo (C15) a intercambio con reflujo de fuel oil pesado, nafta (H1), queroseno (H2), diesel de destilación atmosférica (H3), diésel de destilación a vacío (H4), fuel oil R3 (H5), fuel oil R2 (H6), asfalto (H7), reflujo tope torre vacío RT (H8), queroseno (H9), diesel atm. (H10), fuel oil R3 (H11), reflujo de tope torre a vacío RT (H12), fuel oil R2 (H13), diesel (H14), reflujo fuel oil pesado (H15), reflujo fuel oil pesado (H16).

Las corrientes de servicios de calentamiento y enfriamientos son: vapor (V), agua de enfriamiento (AE).

Los equipos son: tren de precalentamiento (1), hornos (2,4), columna de destilación atmosférica (3,5), despojadores (6,7,8,9), tanque de almacenamiento (10 hasta 15). Las variables son: m= flujo másico, cp = capacidad de calor específico, CP = flujo de capacidad calorífica, Ti = temperatura inicial, Tf = temperatura final, variación de entalpia ( $\Delta H$ ), h=coeficiente pelicular de transferencia de calor.

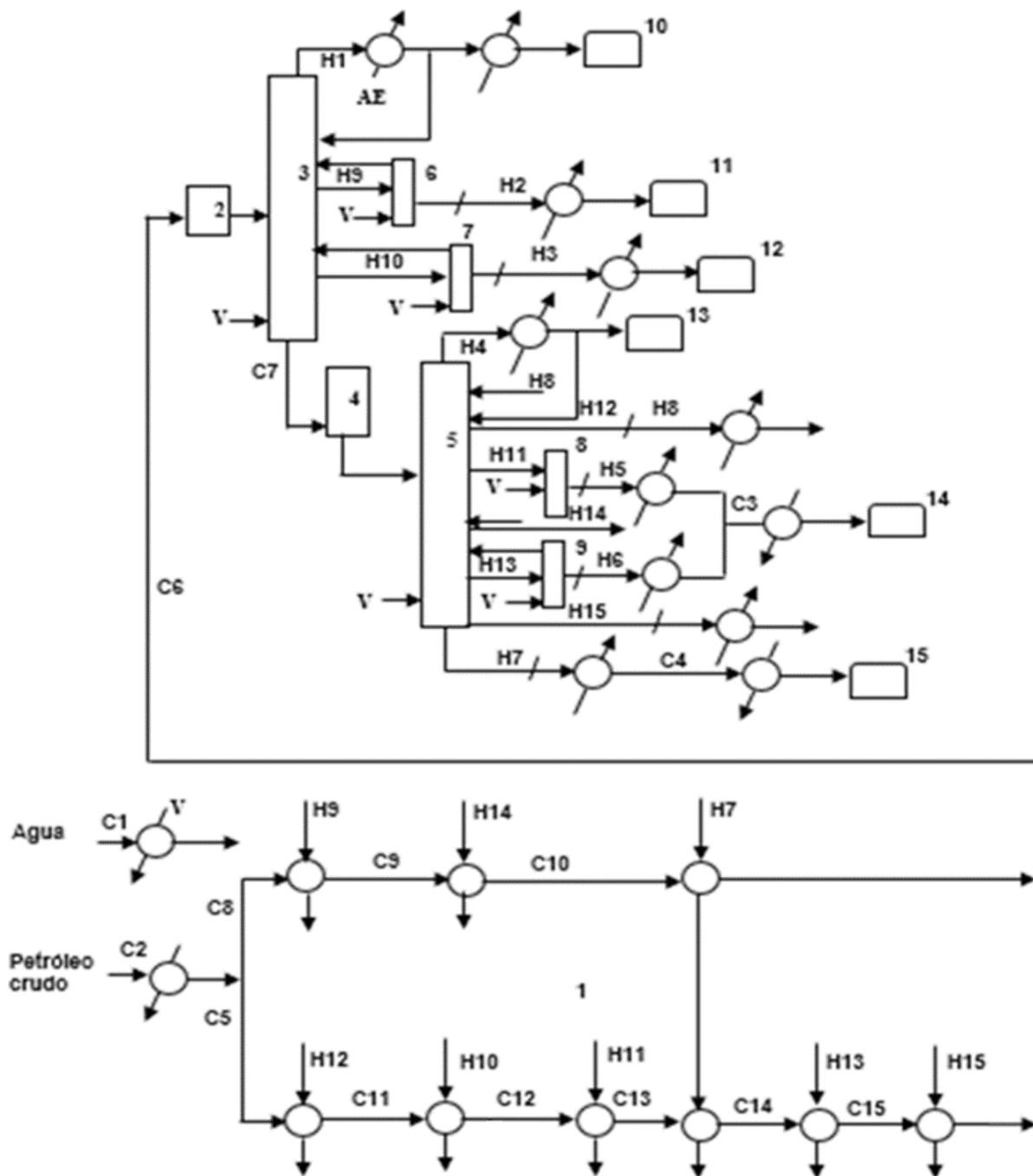


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso. Fuente. Elaboración propia

Tabla 2. Datos de las corrientes.

Corrientes	m	cp	CP=m·cp	Ti	Tf	ΔH	h
	kg/h	kJ/kg °C	kJ/h °C	°C	°C	(104)kJ/h	kJ/m <sup>2</sup> °C
H1	1260	2,3	2898	100	35	18,84	1800

H2	3600	2,13	7668	80	35	34,50	1800
H3	10692	2,09	22346,28	150	60	201,12	1800
H4	504	1,76	887,04	100	40	5,32	7200
H5	1548	2,17	3359,16	80	50	10,08	7200
C1	20833	4,19	87290,27	30	60	261,87	7200
H6	2556	1,96	5009,76	80	50	15,03	1800
H7	21168	2,3	48686,4	320	100	1071,10	7200
C2	41652	1,96	81637,92	30	52	179,60	1800
H8	1296	2,26	2928,96	70	60	2,93	1800
H9	3600	2,13	7668	160	80	61,34	1800
H10	10692	2,09	22346,28	260	150	245,80	1800
H11	1548	2,17	3359,16	180	80	33,59	1800
H12	1296	2,26	2928,96	110	70	11,72	1800
H13	2556	1,96	5009,76	280	80	100,20	1800
C3	4104	2,17	8905,68	50	60	8,91	7200
C4	21168	2,3	48686,4	100	120	97,37	1800
C5	20826	1,96	40818,96	52	65	53,06	1800
C6	41652	1,96	81637,92	190	320	1061,29	1800
C7	25833	1,96	50632,68	300	380	405,06	1800
C8	20810	1,96	40787,6	52	65	53,02	1800
H14	10188	2,88	29341,44	125	78	137,90	1800
C9	20808	1,96	40783,68	65	131	269,17	1800
C10	20808	1,96	40783,68	131	175	179,45	1800
C11	20808	1,96	40783,68	65	87	89,72	1800
C12	20808	1,96	40783,68	87	93	24,47	1800
C13	20808	1,96	40783,68	93	147	220,23	1800
C14	20808	1,96	40783,68	147	182	142,74	1800
C15	20808	1,96	40783,68	182	196	57,10	7200
H15	5292	2,8	14817,6	310	250	88,91	7200
H16	5292	2,8	14817,6	250	120	192,63	7200

A diferencia de temperatura mínima global ( $\Delta T_{\min}$ ) en este caso se establece a 30 °C como suposición inicial.

Las demandas mínimas de servicio caliente y frío son 9086000 kJ/h y 365600 kJ/h, respectivamente, mostradas en el diagrama de las curvas compuestas de la RIC (Figura 3). La temperatura del punto de Pellico ( $T_p$ ) con un valor de 45 °C. Al sumar  $\Delta T_{\min}/2$  a  $T_p$ , el punto de pellizco de las corrientes calientes ocurre a 60 °C. Similarmente, al restar  $\Delta T_{\min}/2$  a  $T_p$ , el punto de Pellizco de las corrientes frías resulta 30 °C

Existe un potencial energético de 21874400 kJ/h, factible de recuperar (MER) en alguna medida mediante intercambio de calor entre corrientes del proceso.

La demanda actual de servicio caliente es 15 % mayor que el requerimiento mínimo de servicio caliente, mientras que la demanda actual de servicio frío es ocho veces el requerimiento mínimo de servicio frío, cuando se comparan los servicios mínimos con las demandas actuales mostradas en la Tabla 1.

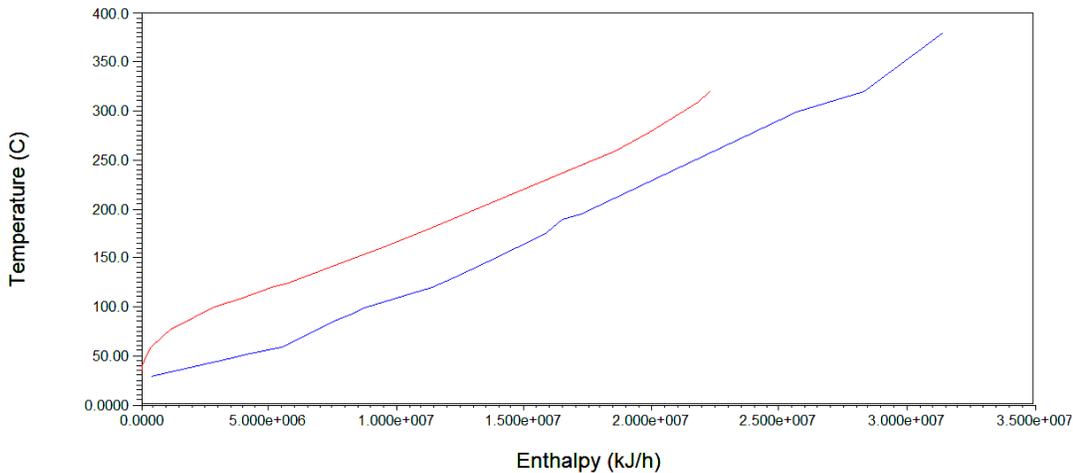


Figura 3. Diagrama de las curvas compuestas de RIC actual.

Una vez determinados los objetivos para la red de intercambio de calor, comienza el desarrollo del diseño de la red de intercambio de calor; siendo necesario interpretar varias reglas y principios que como resultado de su implementación sean satisfechas por un diseño con una máxima recuperación del calor o mínimo consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento (Smith, 2005).

Para evitar las causas de excesos de uso de la energía; en este caso tres unidades con cruces de temperatura (E-109, E-111, E-113) y cuatro unidades con  $\Delta T < \Delta T_{min}$  (E-106, E-108, E-111, E-112), se ajustaron las temperaturas de las corrientes para lograr que  $\Delta T \geq \Delta T_{min}$ .

La Figura 4 muestra el diagrama de rejillas construido con el uso de Aspen Energy Analyzer. Arriba del pellizco, el número de corrientes calientes (NH) es mayor que el número de corrientes frías (NC). Según los algoritmos para la división de corrientes es necesario aumentar NC para que se cumpla que  $NH \leq NC$  y según la regla de desigualdad de CP, se debe cumplir que  $CPh \leq CPc$ , por tanto, es factible la combinación de las corrientes mostradas en la Tabla 3. Debajo del pellizco no hay combinaciones factibles.

Se logra un diseño sin violaciones termodinámicas, pero requiere un análisis de las consideraciones prácticas para modernización de la RIC.

La RIC actual permite recuperar 11 613 829 kJ/h, que representa el 53 % de la MER. En el diseño de la RIC (Tabla 3) se añaden cuatro combinaciones factibles con un potencial de energía recuperable de 2 579 000 kJ/h, lo cual incrementa a 60% el porcentaje de recuperación con un área total de la RIC de 193 m<sup>2</sup>. Por tanto, se logra recuperar 13 071 951 kJ/h de la MER para un ahorro de 7 % de la energía.



En la Tabla 4 se observa que según la combinación de corrientes adoptada se recuperan 13 072 000 kJ/h. Esta demanda de energía representa un ahorro potencial de 1932 t/a en combustible (fuel oil) y 1039938 m<sup>3</sup>/a en agua. Se asumen valor calórico neto del combustible de 40 600 kJ/kg, 250 d/a y 24 h/d, 350 USD/t fuel oil, 0,12 USD/m<sup>3</sup> y temperaturas de entrada y salida del agua de 30 °C y 48 °C.

Los ahorros, expresados en recursos financieros permitirían evaluar la factibilidad de un proyecto de inversión en la red actual de intercambio de calor.

Tabla 4. Resultados del análisis económico

Demanda	Integración de calor $\Delta T_{min} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	Energía recuperada	Ahorro		
			fuel oil (t/a)	agua (m <sup>3</sup> /a)	(USD/a)
	Demanda mínima (kJ/h)	(kJ/h)			
Caliente (vapor)	9086000	13 072 000	1932		676000
Fría (agua)	365 600			1039938	124793
Suma					800793

## CONCLUSIONES

El análisis energético hizo posible la definición de los consumos específicos de energía, vapor y agua de enfriamiento, útil en el establecimiento de una línea base energética para la evaluación sistemática del desempeño energético.

La demanda actual de servicio caliente es 15 % mayor que el requerimiento mínimo de servicio caliente, mientras que la demanda actual de servicio frío es ocho veces el requerimiento mínimo de servicio frío.

El diseño de la red de intercambio térmico satisface el 60 % de la máxima recuperación de la energía con un ahorro de 7 % de la energía en los procesos de precalentamiento del crudo y destilación.

Los ahorros anuales 1932 t de fuel oil y 1039938 m<sup>3</sup> de agua, mediante la integración de calor, permiten evaluar la factibilidad de un proyecto de inversión para mejorar la recuperación del calor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aspen Technology Inc. (2017). Aspen Energy Analyzer V 10. AspenTech. USA. <https://www.aspentech.com/en/products/pages/aspen-energy-analyzer>
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización. (2019). ISO 50001. Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso. ONEI. [http://www.nconline.cubaindustria.cu/index.php?page=m\\_home\\_page.public\\_home\\_page&Block=Inicio](http://www.nconline.cubaindustria.cu/index.php?page=m_home_page.public_home_page&Block=Inicio)
- Marton, S., Svensson, E., Subiaco, R., Bengtsson, F., & Harvey, S. (2017). A Steam Utility Network Model for the Evaluation of Heat Integration Retrofits – A Case Study of an Oil Refinery. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 5 (4), 560-578
- Nemet, A., Klemeš J.J., Varbanov, P., & Mantelli, V. (2015). Heat Integration retrofit analysis—an oil refinery case study by Retrofit Tracing Grid Diagram. *Chem. Sci. Eng.*, 9(2), 163–182
- Querzoli, A., Hoadley, A., & Dyson, T. (2003). Identification of Heat Integration Retrofit Opportunities for Crude Distillation and Residue Cracking Units. *Korean J. Chem. Eng.*, 20(4), 635-641
- Smith, R. (2016). *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley & Sons, Ltd
- Ulyev, L., Vasiliev, M., & Boldryev, S. (2018). Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. *Journal of Environmental Management*, 222, 454 – 464.