

Evaluación del desempeño energético y la recuperación del calor en una refinería de azúcar

Energy performance and heat recovery assessment in a sugar refinery

Juan Pedro Hernández Touset^{1,*}, Lázaro Javier Peralta Lopez², Liván Carlos Hernández Díaz³

¹Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5½, Cuba

²Empresa de Mantenimiento a Grupos Electrógenos Fuel Oil. Santa Clara, Cuba

³Empresa Azucarera George Washington. Santo Domingo, Cuba

*Autor de correspondencia: juanpedro@uclv.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 14 septiembre 2022 **Aceptado:** 3 noviembre 2022 **Publicado:** 7 noviembre 2022

Resumen

La integración de procesos combina varios procesos para reducir el consumo de recursos y las emisiones nocivas, convirtiéndose en un activo importante para garantizar la sostenibilidad de los procesos industriales. Este trabajo tiene el objetivo de establecer los indicadores de desempeño energético de una refinería de azúcar de caña mediante el análisis del uso de la energía y la integración de calor. Se aplica un procedimiento que incluye las metodologías de análisis de la energía y del Análisis del Pellizco, con el uso de HENSAD y Aspen Energy Analyzer. Se determinan el consumo específico de energía y los objetivos de desempeño energético, que son indicadores de progreso en la mejora de la eficiencia energética. El diseño de modificación de la red de intercambiadores de calor permitió definir una unidad de intercambio de calor, al emparejar la corriente de vapor vegetal del tercer efecto con el agua dulce, ahorrando el 89% de agua de enfriamiento y el 0,79% de vapor. Los ahorros anuales de 1 010 571 USD, estimados en el análisis energético y la integración de calor hacen factible la evaluación de proyectos de inversión en el área de la energía.

Palabras clave: integración de calor, azúcar de caña, energía, análisis del pellizco

Abstract

Process Integration combine several processes to reduce consumption of resources and harmful emissions, becoming an important asset in ensuring the sustainability of industrial processes. This paper aims to set the energy performance indicators of a cane sugar refinery through de analysis of energy use and heat integration. A procedure that includes the energy analysis and Pinch Analysis methodologies is applied, with the use of HENSAD and Aspen Energy Analyzer. Main specific energy consumption and targets are determined, which are indicators of progress in improving energy efficiency. The heat exchanger network retrofit design allowed defining a heat exchange unit, by matching the vegetal steam stream of the third effect with sweetwater, saving 89% of cooling water and 0.79 % of steam. Annual savings of 1 010 571 USD estimated in energy analysis and heat integration make the evaluation of investment projects in the energy area feasible.

Keywords: heat integration, sugar cane, energy, pinch analysis

1. Introducción

El uso eficiente de la energía es una necesidad imperativa para mejorar la competitividad y la rentabilidad en las industrias de procesos [1]. Actualmente, una gran cantidad de la energía térmica utilizada en la industria química no se recupera (mediante proceso-intercambio de calor de la corriente del proceso), sino que se elimina como calor residual de bajo grado que termina siendo liberado al medio ambiente [2]. La Integración de Procesos (IP) combina varios procesos para reducir el consumo de recursos y las emisiones nocivas, convirtiéndose en un activo importante para garantizar la sostenibilidad de los procesos industriales [3]. La IP cuando se combina con otras herramientas como la simulación de procesos o HENSAD (simulación, análisis y diseño de red de intercambiadores de calor), es un enfoque poderoso que permite a los ingenieros analizar sistemáticamente los procesos industriales y la interacción entre sus diversas partes. La Tecnología del Pellizco (TP) es una metodología completa derivada de principios científicos simples mediante los cuales es posible diseñar nuevas plantas con costos reducidos de energía y capital, así como donde los procesos existentes requieren modificaciones para mejorar el rendimiento. El Análisis del Pellizco (AP) también analiza los datos del proceso utilizando su metodología para predecir la energía y otros objetivos de diseño, de modo que es posible evaluar las consecuencias de un nuevo diseño o una posible modificación antes de fallar en la implementación real [4]. Desde entonces, esta poderosa metodología se ha extendido a una amplia gama de aplicaciones, como la integración masiva, la gestión del carbono y el análisis de pellizcos financieros [5].

Al incorporar los fundamentos de la termodinámica, el AP se inició como un método de optimización conceptual para la conservación de energía en industrias de procesos [6,7]. El AP, para obtener información más completa, se opera principalmente a través de herramientas gráficas y numéricas para apuntar al plan de máxima recuperación de energía para la síntesis y modernización de la red de intercambiadores de calor (RIC) [8]. El AP se introdujo para el diseño de RIC para maximizar la recuperación de calor del proceso y minimizar los requisitos de los servicios públicos utilizando el enfoque de temperatura mínima ($\Delta T_{\min}$) como una variable de decisión clave. Los diseñadores normalmente realizan un equilibrio entre capital y energía a partir de la relación entre $\Delta T_{\min}$, la utilidad y los costos de capital antes de seleccionar el $\Delta T_{\min}$ óptimo para el diseño básico de RIC [9].

Se pueden obtener beneficios económicos sustanciales mediante la diversificación hacia la fabricación de coproductos. Con el fin de aumentar los beneficios financieros tanto para la fábrica de azúcar crudo como para la operación de valor agregado, los requisitos de energía para ambas operaciones pueden racionalizarse mediante la implementación de una estrategia de integración energética de todos los procesos ubicados en el sitio. La estrategia para la integración energética se desarrolla mediante la aplicación de la TP y se ha aplicado con éxito en otras industrias (en particular, la industria petroquímica) para reducir los requisitos generales de energía. La TP también se ha aplicado a estudios de casos específicos en la industria azucarera de Sudáfrica [10]. La etapa del evaporador fue el objetivo de González [11], que refiere que puede considerarse como un subsistema que genera vapores y condensados a varios niveles de temperatura correspondientes a las etapas de evaporación individuales. Los vapores y condensados son los portadores de calor de temperatura media que se utilizará para el calentamiento de procesos. Una estrategia de modificación que es de particular interés para los operadores de las fábricas de azúcar asume la reducción del consumo de energía mediante la modificación de los subsistemas de evaporación y calefacción de proceso para que sea posible la recuperación de calor. La energía es uno de los principales componentes de costos de la refinería. Por lo tanto, el uso eficiente de esta propiedad es importante para su viabilidad financiera. Se han identificado problemas metodológicos que limitan la eficiencia de las técnicas basadas en el Pellizco en sus aplicaciones a las fábricas de azúcar. Urbaniec introduce un nuevo enfoque en el diseño de modificación de sistemas de energía en

fábricas de azúcar [12]. La idoneidad y la calidad de las soluciones propuestas dependen de la selección del conjunto de datos correctos, que captura todas las demandas de calentamiento y enfriamiento relevantes del proceso considerado [13].

Aprovechando la experiencia acumulada, los métodos ahora se están implementando en el diseño de modificación de los sistemas de energía en el azúcar [14]. La planta de Malelane desarrolló un programa de ahorro de energía. Se llevó a cabo un AP integral para determinar la mejor estrategia de inversión. Este documento examina el uso del AP para determinar la configuración óptima del evaporador y la purga acorde con los beneficios de ahorro de energía, pérdidas mínimas por inversión y formación mínima de color. Se evaluaron los perfiles de temperatura, tiempo de residencia y brix del evaporador para cada diseño. Se consideró el balance inversión/energía al seleccionar un diseño final para los escenarios de producción presentes y futuros [15]. La selección de un proceso de refinación se simplifica cuando la refinería está adjunta a un ingenio de azúcar crudo, y existen oportunidades para un mejor control sobre la calidad del azúcar suministrada a la refinería. Para las refinерías independientes, el proceso de refinación elegido debe ser capaz de refinar los distintos grados de azúcar disponibles en los mercados internacionales en diferentes momentos [16].

Actualmente son escasas las publicaciones sobre la aplicación del AP a plantas completas de refinación de azúcar de caña. La novedad de esta investigación reside en la combinación, en una forma comprensiva, de los métodos de análisis del uso de la energía y de integración de oportunidades de recuperación del calor en una refinería de azúcar de caña. El objetivo de la investigación es establecer los indicadores de desempeño energético de una refinería de azúcar de caña mediante el análisis del uso de la energía y la integración de calor.

2. Materiales y Métodos

La evaluación del desempeño energético de la refinería del central se sustenta en la implementación de las actividades de la revisión energética según la norma cubana ISO 50001:2019 para los sistemas de gestión de la energía. Se aplican las metodologías del balance termoenergético [17,18] y el procedimiento de análisis del uso de la energía [19], que constituyen las principales actividades de la revisión energética, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns).

En el análisis y diseño de la red de intercambiadores de calor se aplica la metodología de Análisis del Pellizco para determinar los objetivos de desempeño energético y la máxima energía recuperable (MER) [20]. El procesamiento de los datos para la integración de calor se realizó mediante HENSAD y Aspen Energy Analyzer. Las principales actividades realizadas en la revisión energética fueron: (1) análisis del uso y consumo de la energía, (2) evaluación del desempeño energético actual, (3) la identificación de oportunidades para mejorar el desempeño energético.

3. Resultados y Discusión

Evaluación del desempeño energético actual

La refinería tiene capacidad nominal de 320 t azúcar refino/d. El sistema termoenergético es independiente del central azucarero y está constituido por un generador de vapor con una capacidad de 45 t/h que utiliza combustible fuel oil. El vapor sobrecalentado a 1,8 MPa es consumido por 1 turbogenerador de 3 MW a contrapresión y 2 válvulas reductoras donde destinan parte del vapor a limpieza y la otra distribuye el vapor de escape a 0,2 MPa, que es consumido por los 3 evaporadores, los 5 calentadores y los 2 tachos. Los tachos tienen una extracción de condensados

puros que se envía a la caldera. En los evaporadores y calentadores se hace una extracción de condensados contaminados que es depositado en otro tanque para uso tecnológico. Para el diagnóstico energético se registran y analizan los consumos actuales (mínimo tres meses) y pasados (dos años) de materia prima y recursos energéticos (combustible, electricidad, agua) y la producción. En la Tabla 1 se muestran los reportes de la electricidad, consumo de azúcar crudo y producción de azúcar refinado.

Tabla 1. Reportes de electricidad, consumo de azúcar crudo y producción de azúcar refinado

Mes	Generación kWh	Consumo kWh	Entrega kWh	Fuel Oil t	Consumo Azúcar crudo t	Producción Azúcar refinado t
Enero	349543	20674	57956	194	2751,07	2147,1
Febrero	440621	23169	83724	838	3340,43	3143,9
Marzo	477718	26186	86247	917,57	4075,55	3631

La Figura 1a muestra que existe correspondencia entre la generación de electricidad, consumo del SEN (sistema electroenergético nacional) y entrega al SEN, valores que permiten determinar el consumo de electricidad de la refinería y definir un indicador de eficiencia, el cual se calcula para el mes de mayor producción (Tabla 2). En la Figura 1b se muestra el consumo de fuel oil y la generación eléctrica en los primeros tres meses del año 2021.

En esta sección se deben describir y explicar los resultados obtenidos, así como ser comparados con resultados previos.

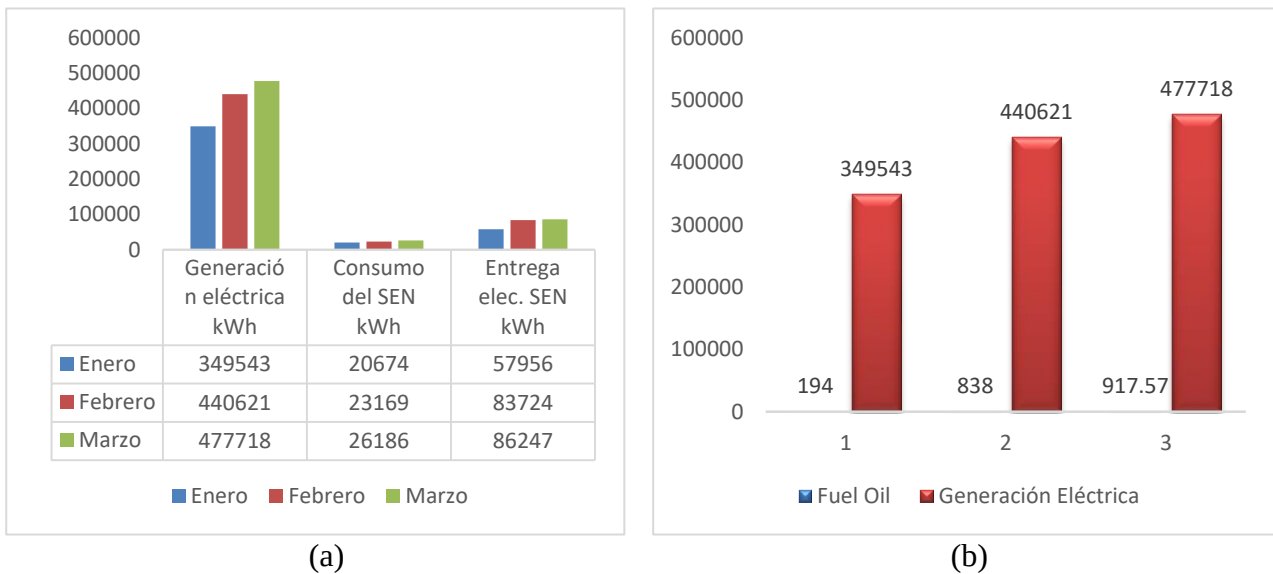


Fig.1 (a) Comportamiento de la electricidad y (b) Consumo de fuel oil

La evaluación del desempeño energético actual incluyó la aplicación de los balances de materiales en etapas de afinación, disolución, primer tratamiento, clarificación y segundo tratamiento, lo que permitió obtener los flujos de las corrientes de licores (crudo, tratado, clarificado, filtrado) para utilizarlos en la integración de calor. Se realizó el balance de vapor en equipos consumidores (turbogenerador, evaporadores, calentadores y tachos); el balance de agua; el balance de calor y la determinación de los indicadores de desempeño energético. Se determina una demanda de vapor de 44 t/h, 14, 2 m³/h de agua de reposición a caldera, una demanda de 1000 m³/h de agua de enfriamiento en los condensadores de evaporadores y tachos y una potencia térmica requerida por el proceso de 37 MW. El consumo de vapor y la potencia térmica están muy cercanas a los valores nominales de la caldera.

En la Tabla 2 se muestran los indicadores de eficiencia de la refinería de azúcar.

Tabla 2. Indicadores de desempeño energético

Indicadores	Calculado	Reportado
Consumo específico de vapor, kg vapor/kg combustible	13,30	-
Consumo específico de combustible, t combustible/t azúcar refino	0,24	0,23 [†]
Consumo específico de azúcar crudo, t azúcar crudo/t azúcar refino	1,11	1,2 - 1,4 [†]
Consumo de electricidad, kWh/t azúcar refino	121	-
Consumo específico de vapor, kg vapor/kWh	11,52	-
Consumo específico de combustible, kg combustible/kWh generados	1,10	-
Consumo específico de vapor, t vapor/t azúcar refino	3,22	-
Consumo específico de vapor, t vapor/t azúcar crudo	2,9	-
Consumo específico de energía térmica, MJ/t azúcar refino	9816	-
Consumo específico de energía térmica, MJ/t azúcar crudo	8834	-
Consumo específico de vapor de baja presión, t vapor/t azúcar crudo	3	-
Flujo de vapor por reductora, %	14,34	12-15
Agua de reposición, %	32,47	<15
Pérdidas de calor, %	13,11	5
Eficiencia térmica, %	88,88	90-95
Eficiencia de la generación, %	97,79	95-100

[†] Reporte de la refinería

Como se observa en la Tabla 2, las pérdidas de calor son superiores a los valores reportados, lo cual influye en la baja eficiencia térmica general. Solo se recuperan los condensados de tachos para uso en la caldera. Se definen 11 IDEns que actualmente no se reportan por la fábrica, los cuales se pueden tener en cuenta en el establecimiento de una línea base energética para la evaluación sistemática del desempeño energético por los productores.

Las pérdidas de recursos energéticos y financieros están dadas por el agua de reposición a caldera y el combustible gastado por desaprovechamiento del calor sensible en el condensado, purgas, fugas y ausencia de aislamiento. En el análisis económico se asume un valor calórico neto del combustible de 40600 kJ/kg, 200 días de operación al año, 24 horas/día y precios del combustible (fuel oil) y agua de 540 \$/t y 0,75 \$/m³, respectivamente. En la Tabla 3 muestran los ahorros potenciales de combustible y agua.

Tabla 3. Ahorros potenciales de combustible y agua

Recurso	Pérdidas		Ahorro potencial		
	kJ/h	m ³ /h	Combustible (t/a)	Agua (m ³ /a)	USD/año
Combustible	14937336,62	-	-	-	953635
Agua	-	14,3	-	68581	51436
Total					1005071

Identificación de oportunidades para la mejorar el desempeño energético en la refinería de azúcar

La determinación de los objetivos de la red de intercambiadores de calor (RIC), tales como los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y de enfriamiento, la máxima energía recuperable (MER), la diferencia de temperatura global mínima ($\Delta T_{\min}$) y el área mínima ($A_{\min}$); se realiza mediante la aplicación de métodos gráficos y numéricos combinados [20].

The diagram illustrates the process flow of a sugar refinery. It starts with raw materials C1, C2, C3, C4, and C5. C1 (Agua) and C2 (Sirope) are mixed and then heated in unit 1. C3 and C4 are also mixed and heated in unit 3. The output of unit 3 is then mixed with the output of unit 1 in unit 4. The output of unit 4 is then mixed with C5 in unit 5. The output of unit 5 is then mixed with the output of unit 4 in unit 6. The output of unit 6 is then mixed with the output of unit 5 in unit 7. The output of unit 7 is then mixed with the output of unit 6 in unit 8. The output of unit 8 is then mixed with the output of unit 7 in unit 9. The output of unit 9 is then mixed with the output of unit 8 in unit 10. The output of unit 10 is then mixed with the output of unit 9 in unit 11, resulting in the final product, Azúcar Refino. The process involves multiple stages of heating, mixing, and separation, with steam (V) and cooling water (AC) being used throughout.

Fig.2 Diagrama de flujo

Revista Cubana de Ingeniería Vol. XIII (3) e337 (2022) ISSN: 2223-1781

Tabla 4. Datos térmicos de las corrientes

Corriente	Flujo (kg/s)	c_p (kJ/kg $^{\circ}$ C)	$C_p = m \cdot c_p$ (kW/ $^{\circ}$ C)	T_i ($^{\circ}$ C)	T_f ($^{\circ}$ C)	ΔH (kW)	h (W/m 2 $^{\circ}$ C)
H1	0,88	2	1,76	56	47	15,86	5000
H2	2,71	2	5,41	56	47	48,71	5000
H3	5,90	2	11,81	56	47	106,27	5000
C1	7,28	4	29,83	28	95	1998,73	3000
C2	5,78	2,33	13,48	40	90	674,03	500
C3	11,07	2,59	28,73	40	60	574,61	2000
C4	11,08	2,6	28,82	60	85	720,50	2000
C5	12,50	2,92	36,60	85	101	584,04	2000
C6	11,86	2,6	30,84	56	70	431,76	2000

Se adopta la convención: H o h (caliente) y C o c (fría)

La $\Delta T_{\min}$ en este caso se establece en 20 $^{\circ}$ C, como suposición inicial. En la Figura 3 se muestra el diagrama de las curvas compuestas generado por el software HENSAD que define las demandas mínimas de servicios de enfriamiento ($Q_{c\min}$) y de calentamiento ($Q_{h\min}$) y la MER. Aquí se presenta un problema típico de umbral que muestra la característica de requerir solo servicio de calentamiento en un rango de valores de $\Delta T_{\min}$ desde cero hasta un umbral de $\Delta T_{\min}$. Se obtiene un $Q_{h\min}$ de 4782 kW, un $Q_{c\min}$ de 19 kW y una MER de 151,8 kW. El punto de Pellizco (T_p) se localiza en 38 $^{\circ}$ C, con una temperatura caliente de 48 $^{\circ}$ C y una temperatura fría de 28 $^{\circ}$ C.

La máxima recuperación de energía, gráficamente, es la región entre $Q_{c\min}$ y $Q_{h\min}$ y se determina mediante la diferencia de la energía disponible acumulativa de la corriente caliente (170,8 kW) y $Q_{c\min}$ (19 kW), esto define un potencial energético recuperable de 151,8 kW, mediante intercambio de calor entre corrientes del proceso.

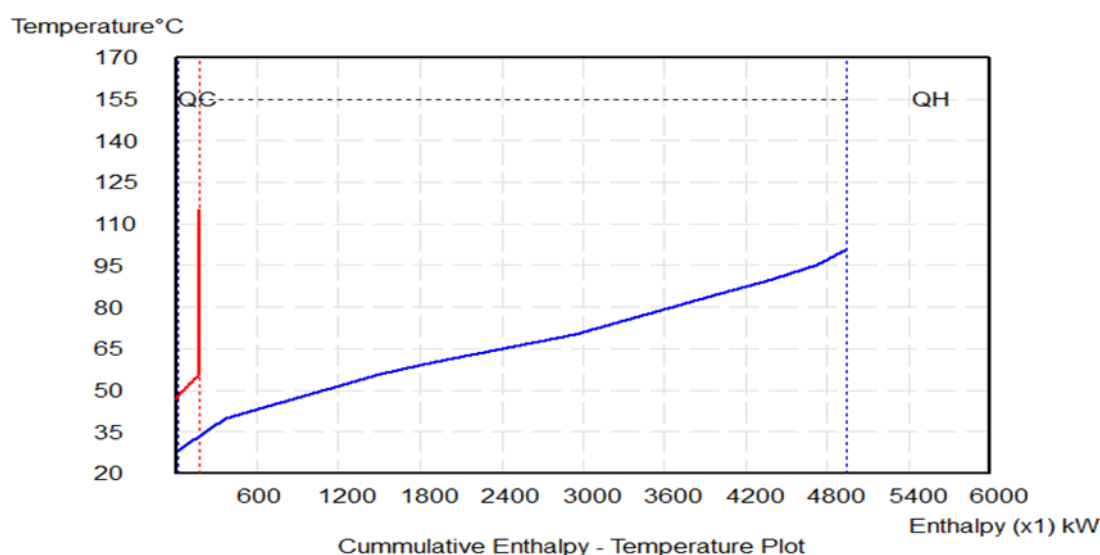


Fig.3 Diagrama de las curvas compuestas de RIC actual

Una vez determinados los objetivos para la red de intercambiadores de calor, comienza el desarrollo del diseño de la red de intercambio de calor, realizado con uso del software Aspen Energy Analyzer.

La Figura 4 muestra los datos de las corrientes en una rejilla. Sobre el pellizco se puede usar vapor (hasta $Q_{h\min}$) con una demanda de 4782 kW y por debajo del Pellizco agua fría (hasta $Q_{c\min}$) con una demanda de 19 kW.

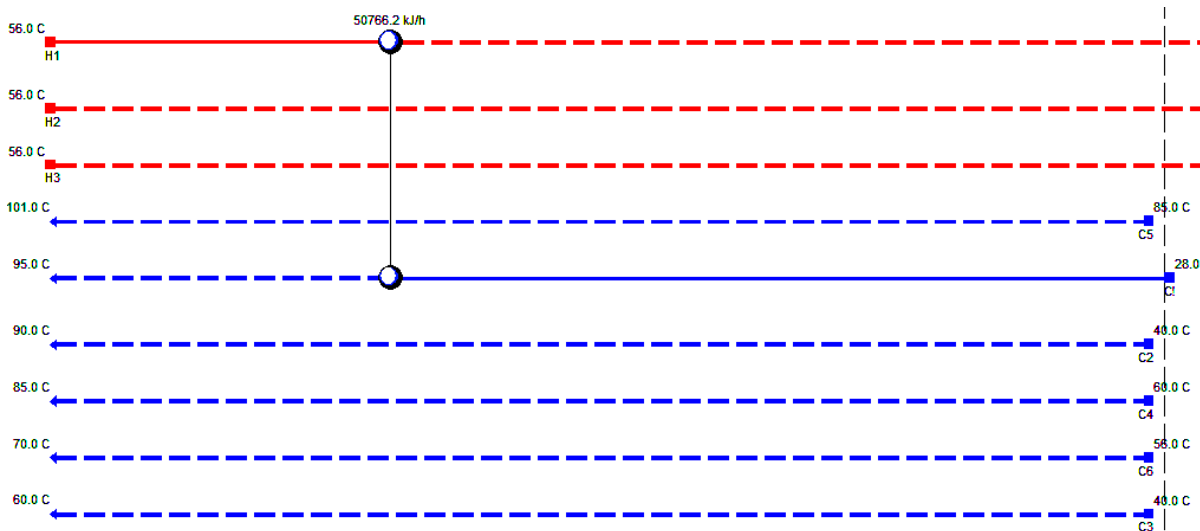


Fig.4 Diseño de la RIC sobre el Pellizco

Se comprueba que $CPh \leq CPc$ (arriba del pellizco), es decir, $1,76 < 29,83$, por tanto, es factible la combinación de las corrientes H1 y C1. La energía acumulada disponible de la corriente caliente es 170,8 kW. Para una $\Delta T_{min} = 20^{\circ}C$ la máxima recuperación de calor (MRC) entre las corrientes calientes y frías según las curvas compuestas es la diferencia 170,8 kW - 19 kW que determina un valor de 151,8 kW, el cual tiene que ser satisfecho mediante intercambio entre corrientes del proceso. El único intercambio posible es calentar la corriente de agua dulce (C1) mediante la evaporación del 3 efecto (H1), lo que favorece la disminución del consumo de vapor para el calentamiento del condensado y del consumo de agua para el enfriamiento. Mediante este intercambio proceso - proceso se alcanza el 9,29 % de recuperación de calor (MRC). La Figura 5a muestra el resultado del cálculo del intercambiador, con un área de 0,32 m² y la Figura 5b la conectividad de las corrientes. En el diseño de la RIC por debajo del pellizco no hay combinaciones factibles.

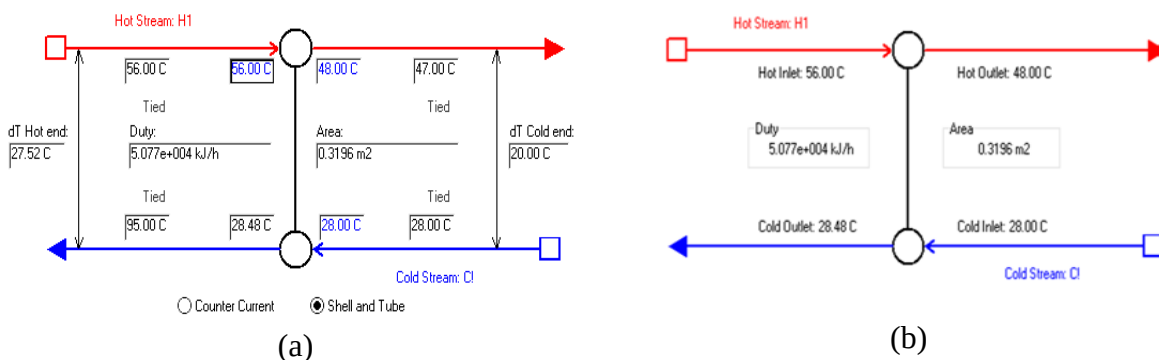


Fig.5 (a) Datos del intercambiador y (b) Conectividad de las corrientes en E-101

El consumo actual de vapor es 44 t/h, aproximadamente 6 veces el consumo mínimo. La potencia térmica total actual es 37 MW y el requerimiento mínimo de servicio de vapor es 4,8 MW, resultados que dependen del sistema de extracción de datos para la aplicación del método de integración de calor. No obstante, esta diferencia, la integración de calor ha permitido identificar las demandas mínima de servicio de calentamiento y enfriamiento y el potencial de recuperación (151,8 kW) de calor (MER), del cual se logra recuperar 14,10 kW que representa el 9,3% mediante el diseño de la RIC.

Mediante la combinación de la corriente de vapor vegetal del tercer vaso con el agua dulce se ahorra el 89% del agua de agua de enfriamiento y el 0,79 de vapor.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis económico. En la columna de análisis energético se muestran de las demandas de servicios de calentamiento y enfriamiento. En la columna designada para la integración de calor se muestran los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y enfriamiento y la MER. En la columna de ahorros los valores de los recursos energéticos y financieros del sistema de recuperación del calor diseñado en la refinería de azúcar.

Tabla 5. Ahorros de combustible y agua

Demandas	Análisis energético		Integración de calor $\Delta T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$			Ahorros			
	MW	m ³ /h	Servicios mínimos			MER kW	t/a FO	m ³ /a	USD/a
			MW	m ³ /h	t/h				
Calentamiento (vapor)	37		4,8	-	7,3	14,10	6,048	-	3266
Enfriamiento (agua)	-	1000	0,019	0,8	-	14,10	-	2938	2204
Total									5470

Se obtiene un ahorro anual de 1 010 541 USD como resultado del análisis energético y la integración de calor, el cual se puede utilizar en la evaluación de la factibilidad de un proyecto de inversión en el área de la energía.

4. Conclusiones

Como resultado del análisis del uso de la energía, se definen varios indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados para esta refinería que contribuyen a la definición de una línea base energética y la medición sistemática de la eficiencia. Existe un exceso en la demanda de potencia térmica de 32,5 MW con respecto a la demanda mínima de servicio de vapor, lo que condiciona la investigación en nuevos diseños de modificación de la red de intercambiadores de calor. El diseño de modificación de la red de intercambiadores de calor permitió definir una unidad de intercambio de calor, al emparejar la corriente de vapor vegetal del tercer efecto con el agua dulce, ahorrando el 89% de agua de enfriamiento y el 0,79% de vapor. Los ahorros anuales de 10010571 USD, estimados en el análisis energético y la integración de calor se pueden utilizar para la evaluación de proyectos de inversión en el área de la energía.

Referencias

1. Ray, A., Kazantzis, N., Foo, D.C., Kazantzi, V., Tan, R.R., Bandyopadhyay, S., *Financial Pinch Analysis for Selection of Energy Conservation Projects with Uncertainties*. Chemical Engineering Transactions, 2021. **88**: p. 109-114. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2188018>
2. Kiss, A.A., *Rethinking Energy Use for a Sustainable Chemical Industry*. Chemical Engineering Transactions, 2019. **76**: p. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976003>
3. Klemeš, J. J., *Handbook of Process Integration(PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions*, 2013. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-0-8570-9593-0

4. Nafiu, B., Usman, El-Nafaty, Isa, S., *Energy Integration of Sugar Production Plant Using Pinch Analysis: A Case Study of Savanah Sugar Company Yola, Nigeria*. Advances in Applied Science Research, 2017. **8**(2): p. 20-29.
5. Ongpeng, J.M.C., Aviso, K.B., Foo, D.C.Y., Tan, R.R., *Graphical Pinch Analysis Approach to Cash Flow Management in Engineering Project*. Chemical Engineering Transactions, 2019. **76**: p. 493-498. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976083>
6. Bandyopadhyay, S., *Incorporating Uncertainties in Pinch Analysis*. Chemical Engineering Transactions, 2021. **88**: p. 73-78. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2188012>
7. Wang, B., Klemeš, J.J., Varbanov, P.S., Zeng, M., Liang, Y., *Heat Exchanger Network Retrofit Using Particle Swarm Optimisation Algorithm*. Chemical Engineering Transactions, 2021. **83**: p. 85-90. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2183015>
8. Lai, Y.Q., Wan Alwi, S.R., Manan, Z.A., *Heat exchanger network synthesis considering different minimum approach temperatures*. Chemical Engineering Transactions, 2019. **72**: p. 283-288. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1972048>
9. Klemeš, J.J., Wang, Q.W., Varbanov, P.S., Zeng, M., Chin, H.H., Lal, N.S., Li, N.Q., Wang B., Wang X.C., Walmsley T.G., *Heat transfer enhancement, intensification and optimization in heat exchanger network retrofit and operation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **120**: p. 85-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109644>
10. Lavarack, B.P., *Application of Energy Integration Techniques (Pinch Technology) to reduce process steam consumption for raw sugar factories*. International Sugar Journal, 2007. **109**: p. 499-504. ISSN/ISBN: 0020-8841.
11. González M., Verelst H., Gonzales, E., *Energy integration of multiple effect evaporators in sugar process production*. Chemical Engineering Transactions, 2010. **21**: p. 277-282. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1021047>
12. Urbaniec, K., Zalewski, P., Zhu, X.X., *A decomposition approach for retrofit design of energy systems in the sugar industry*. Applied Thermal Engineering, 2000. **20**: p. 1431-1442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00017-X)
13. Varbanov, P.S., Yong, J.Y., Klemeš, J.J., Chin, H.H., *Data Extraction for Heat Integration and Total Site Analysis: A Review*. Chemical Engineering Transactions, 2019. **76**: p. 67-72. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976012>
14. Smith, R., Jobson M., Chen L., *Recent development in the retrofit of heat exchanger networks*. Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(16): p. 2281-2289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.06.006>
15. Singh, I., Riley, R., Seillier, D., *Using pinch technology to optimise evaporator and vapour bleed configuration at the Malelane Mill*. Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass., 1997. **71**. p. 207-216.
16. Al Ghurair, J., Singh, G., Khaleej, A., *Sugar an Energy Efficient Refinery*. Sugar Industry Technologists Meeting, 1999. p. 1-23.
17. Espinosa, R., Hernández, J.P., Espinosa, J., Castellanos, J., *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*, 2019. La Habana: Editorial Universitaria Félix Varela. ISBN 978-959-07-2326-1.
18. Hernández, J.P., Espinosa, R., Pérez, C., García, A.M., García, A., *Gestión energética en un central de azúcar crudo con uso del software STA 4.1*. Centro Azúcar, 2020. **47**(1): p. 77-89.
19. Hernández, J.P., de Armas, A.C., Espinosa, R., Pérez, O., Guerra, L., *Procedimiento de análisis energético para la conversión de industrias de la caña de azúcar en biorrefinerías*. Revista Universidad y Sociedad, 2021. **13**(5): p. 277-288.
20. Smith, R., *Chemical Process Design and Integration*, 2016. Chichester, West Sussex UK: John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-48680-9.

Conflicto de Intereses

Lo sautores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Juan Pedro Hernández Touse. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>
Participó en la conceptualización, metodología, investigación y redacción.

Lázaro Javier Peralta López. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4083-3042>
Participó en curación de datos, investigación y redacción

Liván Carlos Hernández Díaz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2069-7469>
Participó en curación de datos, investigación