

Análisis del desempeño energético en una refinería de azúcar crudo

Energy performance analysis in a raw sugar refinery

Juan Pedro Hernández-Touset^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>

Eliani Sosa-Gomez¹ <https://orcid.org/0000-0003-2257-7348>

¹Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: juanpedro@uclv.edu.cu

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 artículo tiene el objetivo de establecer los indicadores de desempeño energético de una refinería de azúcar de caña. Se aplica un procedimiento que incluye las metodologías de análisis de la energía y del Análisis del Pellizco, con el uso de HENSAD. Los objetivos e indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados para esta refinería 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 calentamiento, lo que condiciona la investigación en diseños de modificación de la red de intercambiadores de calor. 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 energy performance indicators of a cane sugar refinery. A procedure that includes the energy analysis and Pinch Analysis methodologies is applied, with the use of HENSAD. Targets and energy performance indicators, currently not reported for this refinery, contribute to the definition of an energy baseline and the systematic measurement of efficiency. There is an excess in thermal power duty of 32,5 MW with respect to the minimum heating duty, which determines the research into retrofit designs of the heat exchanger network. 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.

Recibido: 10/04/2022

Aceptado: 18/07/2022

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 (ΔT_{\min}) como una variable de decisión clave. Los diseñadores normalmente realizan un equilibrio entre capital y energía a partir de la relación entre ΔT_{\min} , la utilidad y los costos de capital antes de seleccionar el ΔT_{\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 del artículo de González.⁽¹¹⁾ 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 calor para la identificación de oportunidades de recuperación del calor. El objetivo de la investigación es establecer los indicadores de desempeño energético en una refinería de azúcar de caña.

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.⁽²¹⁾

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) Determinación del ahorro de recursos energéticos para mejorar el desempeño energético.

Resultados y discusión

Análisis del uso y consumo de la energía

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 diagnostico 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 registrados de la electricidad, consumo de azúcar crudo y producción de azúcar refino.

Tabla 1- Reportes de electricidad, consumo de azúcar crudo y producción de azúcar refino

Mes	Generación kWh	Consumo kWh	Entrega kWh	Fuel Oil t	Consumo Azucar crudo t	Producción Azucar refino 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 1 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 de azúcar refino (tabla 2). En la figura 2 se muestra el consumo de fuel oil y la generación eléctrica en los primeros tres meses del año 2021.

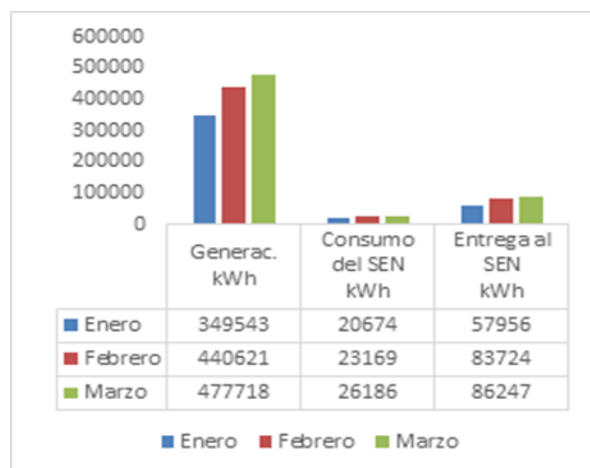


Fig. 1- Comportamiento de la electricidad y (b) Consumo de fuel oil.

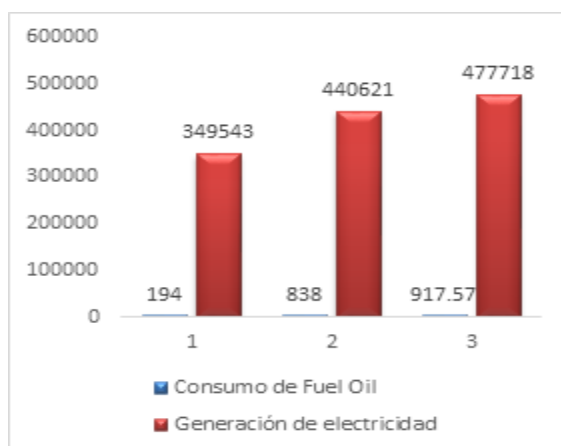


Fig. 2- Consumo de fuel oil y la generación eléctrica en los primeros tres meses del año 2021.

La refinería reporta dos indicadores de eficiencia: el consumo específico de combustible (t combustible/t azúcar refino) con un valor de 0,23 y el consumo específico de azúcar crudo (t azúcar crudo/t azúcar refino) con un valor de 1,2 - 1,4.

Evaluación del desempeño energético actual

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. Mediante las ecuaciones (1) a la (5) se

determinaron los flujos de las corrientes de azúcar afinada (AA), licor crudo (LC), licor tratado (LT), licor clarificado (Lc) y licor filtrado (LF); necesarios para la aplicación del Análisis del Pellizco.

$$AA + H_2O_D + DC = LC \quad (2)$$

$$AC + S = M + AA \quad (1)$$

$$LT = CA + Lc \quad (4)$$

$$LC + AF + CAL + PH = LT \quad (3)$$

$$Lc + Ca + H_2O = LF + TO + H_2O_D \quad (5)$$

Se realizó el balance de vapor en equipos consumidores (turbogenerador, evaporadores, calentadores y tachos). El flujo de vapor por la válvula reductora (G_{VR}) está dado por la ecuación (6) que se obtiene por la diferencia del consumo de vapor de los equipos de baja presión (G_{NT}) y de los motores primarios, que en este caso es un turbogenerador (G_{TG}). Otros consumos de vapor de alta presión (G_{otros}) se estiman por la ecuación (7).

$$G_{VR} = G_{NT} - G_{TG} \quad (6)$$

$$G_{otros} = 0,03 \cdot G_{TG} \quad (7)$$

La potencia térmica requerida por el proceso (G_{cald}), expresada en kg/h, está dada por la ecuación (8).

$$G_{cald} = (G_{VR} + G_{TG} + G_{otros}) \cdot 1,1 \quad (8)$$

Para el balance de condensados se adopta que G_{cald} es igual a la cantidad vapor condensado (G_{acald}). La disponibilidad de condensados puros (G_{apuros}) solo se obtiene de los tachos ($G_{atachos}$) y los flujos de condensados contaminados G_{acont} provienen de los calentadores (G_{acal}) y del triple efecto evaporador ($G_{atriple}$). El agua de reposición ($G_{aguarep}$) está dada por la ecuación (9).

$$G_{aguarep} = G_{acald} - G_{apuros} \quad (9)$$

La potencia térmica requerida por el proceso (Q_{cald}) y las pérdidas de calor (Q_{perd}) están dadas por las ecuaciones (10) y (11), respectivamente, expresadas en kJ/h.

$$Q_{cald} = G_{cald} \cdot i_0 \quad (10)$$

$$Q_{perd} = Q_{cald} - (Q_{TG} + Q_{NT} + Q_{otros} + Q_{cond}) \quad (11)$$

La tabla 2 muestra los principales resultados de los balances de vapor, agua y calor.

Tabla 2. Resultados de los balances de vapor, agua y calor

Balance de vapor	
Consumo de vapor del turbogenerador, kg/h	34 560
Demanda total de vapor, kg/h	44 004
Balance de agua	
Condensados puros, kg/h	29 716,36
Condensados contaminados, kg/h	15 527,71
Agua de reposición, kg/h	14287,84
Balance de calor	
Demanda total de calor, kJ/h	134 283 226

El consumo de combustible y la eficiencia térmica general están dadas por las ecuaciones (12) y (13). La eficiencia de la generación se determina mediante la ecuación (14), donde G_{nom} es la capacidad nominal del generador de vapor.

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{Q_{cald}}{VCN_{comb}} \quad (12)$$

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{Q_{cald} - Q_{perd}}{Q_{cald}} \cdot 100 \quad (13)$$

$$\text{Eficiencia de generación} = \frac{G_{cald}}{G_{nom}} \cdot 100 \quad (14)$$

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, por tanto, muy limitada para satisfacer el consumo de vapor.

En la tabla 3 se muestran los indicadores de eficiencia de la refinería de azúcar.

Tabla 3- 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	10-15
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 3, 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 4 muestran los ahorros potenciales de combustible, asociados a los gastos actuales de combustibles por perdidas de calor. Los ahorros potenciales de agua están asociados a los gastos actuales por reposición de agua a caldera.

Tabla 4- 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

Establecimiento de los objetivos de la red de intercambiadores de calor 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 (ΔT_{min}) y el área mínima (A_{min}); se realiza mediante la aplicación de métodos gráficos y numéricos combinados.⁽²⁰⁾

En la figura 3 se muestra el diagrama simplificado del proceso de fabricación de azúcar refinado. Los flujos de las corrientes se determinaron mediante los balances de materiales y energía, realizados en el presente estudio.

Las corrientes consideradas en el análisis son: agua (C1), miel de afinación (C2), licor a disolutor (C3), licor tratado (C4), licor tratado primer vaso (C5), masa cocida a tanque de mezcla (C6), evaporación tercer vaso (H1), evaporación tacho 1 (H2), evaporación tacho 2 (H3).

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

Los equipos son: calentador de agua (1), tanque de mezcla sirope/azúcar crudo (2), disolutor (3), tanque licor tratado (4), evaporador vaso 1 (5), condensador vaso

3 (6), condensador tacho 1 (7), condensador tacho 2 (8), tanque de mezcla (9), centrifugas (10), secador (11).

Las variables son: m = flujo másico, c_p = capacidad de calor específico, CP = flujo de capacidad calorífica, T_i = temperatura inicial, T_f = temperatura final, variación de entalpia (ΔH), h =coeficiente pelicular de transferencia de calor.

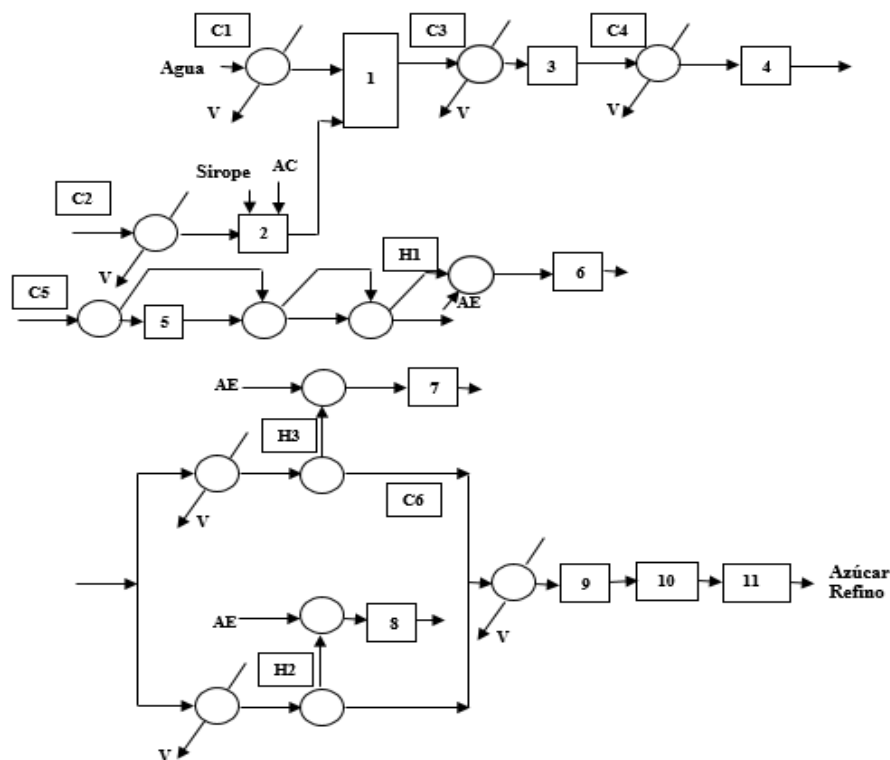


Fig. 3- Diagrama de flujo.

La tabla 5 muestra los datos de las corrientes consideradas para la aplicación del método de Análisis del Pellizco.

Tabla 5- Datos térmicos de las corrientes

Corriente	Flujo (kg/s)	c_p (kJ/kg°C)	$CP = m \cdot c_p$ (kW/°C)	T_i (°C)	T_f (°C)	ΔH (kW)	h (W/m ² °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 ΔT_{\min} en este caso se establece en 20 °C, como suposición inicial. En la figura 4 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.

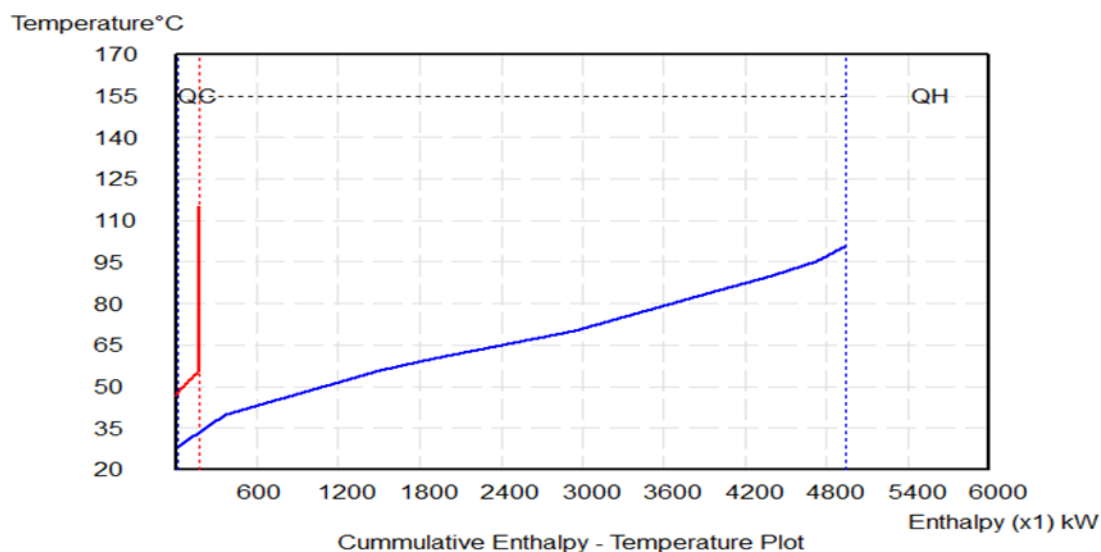


Fig. 4- Diagrama de las curvas compuestas de RIC actual.

Aquí se presenta un problema típico de umbral que muestra la característica de requerir solo servicio de calentamiento en un rango de valores de ΔT_{\min} desde cero hasta un umbral de ΔT_{\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 °C, con una temperatura caliente de 48°C y una temperatura fría de 28 °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.

Conclusiones

1. Los objetivos e indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados para esta refinería contribuyen a la definición de una línea base energética y la medición sistemática de la eficiencia.
2. 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 diseños de modificación de la red de intercambiadores de calor.
3. Los ahorros anuales de 1 005 071 USD, estimados en el análisis energético se pueden utilizar para la evaluación de proyectos de inversión en el área de la energía.

Nomenclatura

AC = azúcar crudo

S = sirope (t/d)

M = miel (t/d), H₂O_D = agua dulce

DC = decolorante catiónico

AF = ácido fosfórico

CAL = lechada de cal

PH = peróxido de hidrógeno

CA = cachaza, Ca = carbón activado (t/d)

H₂O = agua

TO = torta

i₀ = entalpia del vapor de alta presión

VCN_{comb} = valor calórico neto del combustible

Referencias bibliográficas

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**, pp. 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**, pp. 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*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. 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), pp. 20-29. <https://www.primescholars.com/articles/energy-integration-of-sugar-production-plant-using-pinch-analysis-a-case-study-of-savanah-sugar-company-yola-nigeria.pdf>
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**, pp. 493-498. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976083>
6. BANDYOPADHYAY, S. Incorporating Uncertainties in Pinch Analysis. *Chemical Engineering Transactions*, 2021, **88**, pp.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**, pp. 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**, pp. 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 optimisation in heat exchanger network retrofit and operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, **120**, pp. 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**, pp. 499-504. ISSN/ISBN: 0020-8841
11. GONZÁLEZ, M., Verelst H., González, E. Energy integration of multiple effect evaporators in sugar process production. *Chemical Engineering Transactions*, 2010, **21**, pp. 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**, pp. 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**, pp. 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), pp. 2281-2289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.06.006>
15. SINGH, I., Riley, R. and Seillier, D. Using pinch technology to optimise evaporator and vapour bleed configuration at the Malelane Mill. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.*, 1997, **71**, pp. 207–216. https://sasta.co.za/download/8/1990-1999/2923/1997_singh_using-pinch-technology-to.pdf ISSN 0370-1816
16. AL GHURAIR, J., Singh, G. Al Khaleej Sugar: An Energy Efficient Refinery. *Sugar Industry Technologists Meeting*. Estoril, Portugal, may 9-12, 1999, pp. 1-23, <https://sugaronline.com/wp-content/uploads/sites/7693/2018/07/AIKhaleejEnergyEfficientRefinery1999.pdf>
17. ESPINOSA, R., Hernández, J. P., Espinosa, J., Castellanos, J. *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*. La Habana: Editorial Universitaria Félix Varela, 2019. ISBN 978-959-07-2326-1. <http://bibliografia.eduniv.cu:8083/read/32/pdf>
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. <http://centrozucar.uclv.edu.cu/> ISSN 0253-5777
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), pp. 277-288. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus> ISSN 2218-3620

20. SMITH, R. *Chemical Process Design and Integration*. Chichester, West Sussex UK: John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 0-471-48680-9

21. TURTON R. Richard Turton Professor, Chemical and Biochemical Engineering, WVU, Morgantown, USA, 1991. Informe <https://richardturton.faculty.wvu.edu/files/d/23f41a8a-c4b4-4fdd-8bfe-bcab0f9ca0c3/hensad.zip>

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Juan Pedro Hernández Touset.: participó en la conceptualización, metodología, investigación y redacción.

Eliani Sosa Gómez: participó en registro y análisis de datos de la industria, investigación y redacción.