

Artículo Original

***DESEMPEÑO ENERGÉTICO E INTEGRACIÓN DEL CALOR EN EL
PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MELADURA***

***ENERGY EFFICIENCY AND HEAT INTEGRATION IN THE SYRUP
PRODUCTION PROCESS***

Lisandra Guevara Orozco^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9940-9425>

Claudia Guirola Céspedes¹ <https://orcid.org/000-0002-7455-9590>

Juan Pedro Hernández Touse¹ <https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>

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

Recibido: Diciembre 17, 2024; Revisado: Enero 5, 2025; Aceptado: Febrero 10, 2025

RESUMEN

Introducción:

El uso racional de la energía tiene gran importancia en los tiempos actuales debido a la escasez de los combustibles fósiles, el encarecimiento de los mismos y el impacto negativo que tienen sobre el medio ambiente. En consecuencia de esto, se están manejando los términos de integración de procesos, que permiten reducir los consumos de materiales y energía, así como disminuir las emisiones de gases a la atmósfera.

Objetivo:

Evaluar el desempeño energético de la producción de meladura y aplicar la Integración de Procesos (IP) para lograr ahorros potenciales recursos materiales y energéticos.

Materiales y Métodos:

Para determinar y analizar los indicadores de desempeño energético (IDEns) se aplican las metodologías del balance termoenergético mientras que para el análisis y diseño de la red de intercambiadores de calor se aplica la metodología de Análisis del Pellizco.

Resultados y Discusión:

Los resultados muestran las posibilidades de ahorro de energía pudiendo recuperarse el 95 % de la máxima energía recuperable (MER).

Conclusiones:

La producción de meladura presenta varios desafíos en cuanto a su desempeño



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lisandra Guevara, Email: lgorozco@uclv.cu



energético con una gestión inadecuada de la recuperación del calor y la generación de vapor. Los resultados obtenidos mediante la construcción de la tabla problema indican que el proceso no requiere servicio de enfriamiento. Con la IP se pueden obtener ahorros anuales de \$ 526 525,79 en combustible y agua de enfrentamiento.

Palabras clave: análisis del pellizco; energía; integración de procesos; máxima energía recuperable.

ABSTRACT

Introduction:

The rational use of energy is of great importance in current times due to the scarcity of fossil fuels, their increase in cost and the negative impact they have on the environment. As a consequence of this, the terms of process integration are being handled, which allow reducing materials and energy consumption, as well as reducing gas emissions into the atmosphere.

Objective:

To evaluate the energy performance of syrup production and apply Process Integration (PI) to achieve potential savings in material and energy resources.

Materials and methods:

To determine and analyze the energy performance indicators (IDEns), the thermoenergy balance methodologies are applied, while the Pinch Analysis methodology is applied to the analysis and design of the heat exchanger network.

Results and discussion:

The results show the possibilities of energy savings being able to recover 95% of the maximum recoverable energy (MER).

Conclusions:

Syrup production presents several challenges in terms of its energy performance with inadequate management of heat recovery and steam generation. The results obtained through the construction of the problem table indicate that the process does not require cooling service. With the IP, annual savings of \$526 525.79 can be obtained in fuel and cooling water.

Keywords: pinch analysis; energy; process integration; maximum recoverable energy.

1. INTRODUCCIÓN

La energía posibilita y facilita toda la actividad humana. Las diferentes fuentes y sistemas de producción y uso de la energía utilizadas por el hombre, han marcado las grandes etapas en el desarrollo de la sociedad humana, dependiendo el curso de este, de las elecciones energéticas realizadas en cada momento (Almiral, 2009), (Cañizarez et al., 2014). El modelo energético actual, basado fundamentalmente en la utilización de los combustibles fósiles es insostenible por lo que se requiere entonces el aprovechamiento de los recursos desde el incremento de la eficiencia energética para su repercusión positiva en el impacto global que manifiesta hoy en día la contaminación y con ello, los efectos negativos asociados a la misma, también de un carácter global

(González, 2020), (Iturralde et al., 2021).

Los sistemas de gestión energética (SGE) surgen con el objetivo de conseguir la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía (Espinosa et al., 2019). En los procesos industriales, deben ser capaces no solo de optimizar el consumo de energía, sino también producirla en aras del mejoramiento del mismo (Zhu, 2014), (Cruz et al., 2021). El análisis de los SGE de una instalación brinda los elementos necesarios para proceder a la integración de procesos (IP), la cual constituye una poderosa herramienta que permite integrar parte de un proceso o varios procesos para lograr ahorros potenciales recursos materiales y energéticos (Rosales et al., 2020).

Existen varios métodos para realizar la integración energética en un proceso industrial; uno de los más difundidos es el Método del Análisis del Pellizco (Visval & Proaño, 2014). Este constituye una estrategia para el diseño de redes de intercambiadores de calor e identifica las oportunidades de ahorro de energía tanto en diseños nuevos como en el mejoramiento de plantas en operación con el objetivo de determinar la red de cambiadores de calor con mínima área de transferencia de calor, mínimos costos de capital, energía y emisiones contaminantes, (Aas, 2019), (Cruz et al., 2021).

Los trabajos realizados por (Rosales et al., 2020), (Cruz et al., 2021), (Hernández et al., 2022) han estudiado la IP en la industria azucarera y derivados; no obstante, la producción de meladura, implementada en la industria cubana en respuesta a las deficientes producciones azucareras en los últimos años, no ha sido estudiada adecuadamente en materia de integración energética; es por ello que el presente trabajo tiene por objetivo evaluar el desempeño energético de la producción de meladura y aplicar la Integración de Procesos (IP) para lograr ahorros potenciales recursos materiales y energéticos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación del desempeño energético actual del proceso de producción de meladura se basa en la norma cubana ISO 50001, (2019) para los sistemas de gestión de la energía. Para determinar y analizar los indicadores de desempeño energético (IDEns) se aplican las metodologías del balance termoenergético (Espinosa et al., 2019); (Hernández et al., 2020).

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), (Smith, 2016).

La metodología del pellizco parte de determinar las corrientes frías (F_1 , $F_2...$) y corrientes calientes (C_1 , $C_2...$) y los datos de cada una de ellas.

Las corrientes consideradas en el análisis son: jugo mezclado (F_1), jugo clarificado (F_2), jugo clarificado caliente (F_3), agua condensada (C_1), extracción de vapor vaso 1 (C_2), extracción de vapor preevaporador (C_3), evaporación vaso 3 (C_4). Los equipos son: calentador líquido – líquido (1), calentador primario (2), calentador rectificador (3), calentador jugo clarificado (4), preevaporador (5), condensador (6).

En la figura 1 se muestra el diagrama simplificado del proceso de producción de meladura y en tabla 1 los datos de las corrientes consideradas en este análisis.

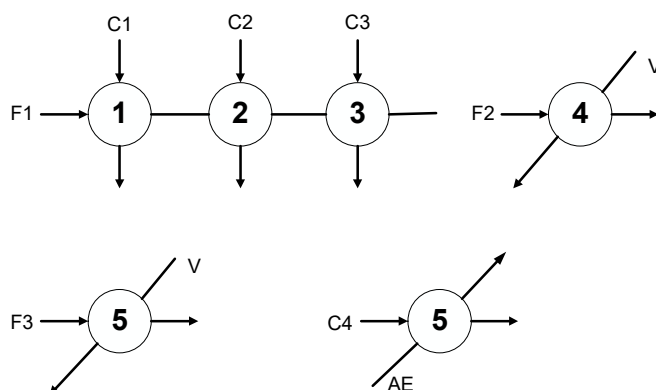


Figura 1. Diagrama simplificado del proceso de producción de meladura

Tabla 1. Datos de las corrientes

<i>Corrientes del proceso</i>	<i>M (kg/s)</i>	<i>C_p (kJ/kg°C)</i>	<i>CP (kW/°C)</i>	<i>T_i (°C)</i>	<i>T_f (°C)</i>	<i>ΔH (kW)</i>
C1	17,40	4,19	72,88	91	85	437,28
C2	1,28	1,88	2,41	102	90	28,99
C3	0,17	1,88	0,32	115	100	4,83
C4	1,93	1,88	3,63	54	48	21,83
F1	18,96	3,84	72,83	34	105	5 171,16
F2	16,14	3,84	62,00	95	102	434,05
F3	16,14	3,84	62,00	102	115	806,11

Donde M, flujo másico; Cp, capacidad calorífica específica; CP, flujo de capacidad calorífica; Ti, temperatura inicial; Tf, Temperatura final; ΔH, variación de entalpía; Ti*, temperatura inicial modificada, Tf, temperatura final modificada.

Para corrientes azucaradas la capacidad calorífica (Cp) se determina por la ecuación (1) definida por Hugot (1986) y empleada por Mendieta & Escalante, (2013).

$$C_p = 4,19 - 2,5121 \cdot 10^{-2} \cdot Bx \quad (1)$$

El procesamiento de los datos para la integración de calor se realizó mediante HENSAD y Aspen Energy Analyzer, (Aas, 2019).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

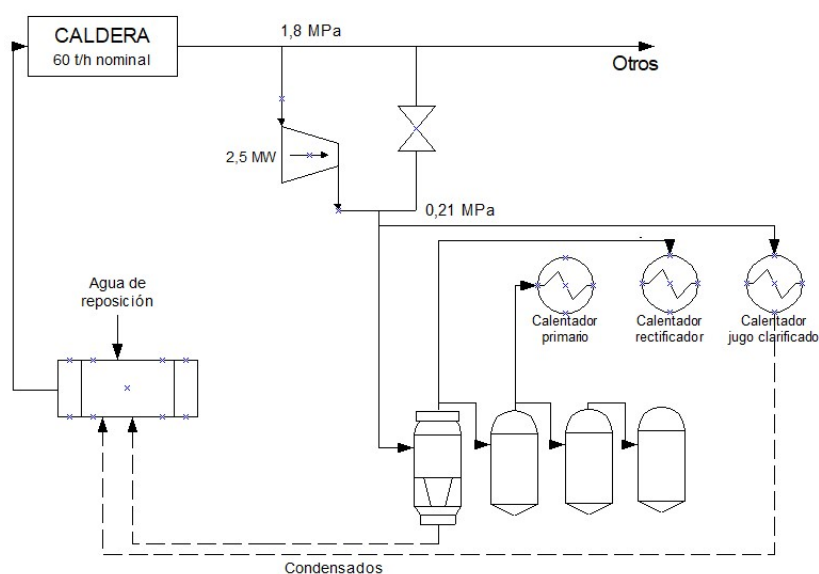
3.1 Balances de materiales y energía. Desempeño energético actual

Los balances de materiales y energía para la producción de meladura se realizaron para una capacidad de producción de 1 500 t/d de caña y permitieron obtener flujos de materiales involucrados. En la tabla 2 se muestran estos resultados.

Tabla 2. Resultados de los balances de masa y energía

<i>Etap</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Molienda	Agua de imbibición	17 331,25	kg/h
	Masa de bagazo	20 456,25	
	Jugo en los molinos	59 375	
Calentamiento	Jugo mezclado	68 281,25	
	Masa de agua para calentador 1	62 666,32	
	Masa de vapor para calentador 2	4 626,54	
	Masa de vapor calentador 3	2 191,39	
	Masa del vapor calentador 4	617,22	
Filtración	Masa de cachaza	2 135,41	
	Masa de lodos	11 041,66	
	Jugo de los filtros	8 906,25	
Clarificación	Floculantes	0,18	
	Jugo claro	58 132,99	
Pre-evaporación y evaporación	Masa del jugo que sale del preevaporador	31 973,14	
	Consumo de vapor preevaporación	28 294,72	
	Evaporación total	44 462,76	
	Meladura producida	1 370,22	

El sistema termoenergético de esta industria tal y como se observa en la figura 2, está constituido por una caldera con una capacidad nominal de 60 t/h en la que se produce un vapor de alta presión a 1,8 MPa el cual es distribuido entre un turbogenerador de capacidad nominal 2,5 MW, una válvula reductora y otros servicios. El vapor de escape a 0,21 MPa que sale de estos equipos va al preevaporador y al calentador de jugo clarificado. Por su parte, el preevaporador produce un vapor vegetal que se envía al primer vaso del triple efecto y se le realiza además una extracción para el calentador rectificador; el primer vaso tiene una extracción que se envía al calentador primario.

**Figura 2.** Esquema termoenergético

Los resultados obtenidos a partir del balance termoenergético se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del balance termoenergético

<i>Consumidores de vapor</i>	<i>Consumo de vapor por equipos</i>	<i>Valor (t/h)</i>
	Caldera	31,65
Motores primarios	Válvula Reductora	4,1
	Turbogeneradores	24,73
Necesidades tecnológicas	Preevaporador y calentador de jugo clarificado	28,9
Otros (Limpieza y otras necesidades en el proceso)	-	1,2

Con los resultados anteriores y los balances de masa y energía se determinaron los indicadores de desempeño energético, mostrándose los resultados en la tabla 4.

Tabla 4. Indicadores de desempeño energético

<i>Indicadores</i>	<i>Calculado</i>	<i>Reportado (Hernández et al., 2022)</i>
Consumo específico de vapor (kg vap/kg comb)	2,23	-
Consumo específico de combustible (t comb/t melad)	1,03	-
Consumo específico de caña (t caña/t miel)	4,57	-
Consumo específico de energía térmica (MJ/t miel)	7132,39	-
Consumo específico de energía térmica (MJ/t caña)	1560,02	-
Consumo específico de vapor (t vap/t miel)	2,31	-
Consumo específico de vapor (t vap/t caña)	0,50	-
Consumo específico de vapor de baja presión (tvapor/t caña)	4,62	-
Consumo específico de vapor (kg vap/KW-h)	12,66	-
Consumo específico de combustible (kg comb/KW-h)	5,67	-
Flujo de vapor por reductora, %	13,18	12-15
Agua de reposición, %	8,66	< 15
Pérdidas de calor, %	9,49	5
Eficiencia térmica, %	90,50	90-95
Eficiencia de la generación, %	52,76	95-100

Como se observa en la tabla 3, solo el flujo de vapor por válvula reductora, el porcentaje de agua de reposición y la eficiencia térmica se encuentran dentro de los rangos permisibles de acuerdo a los valores reportados por (Hernández et al., 2022) para una refinería de azúcar, lo cual es preocupante para la industria pues indica que en varias áreas se está perdiendo la eficiencia. Por su parte, las pérdidas de calor, superan en un 4,49 % al valor reportado por estos autores; lo que sugiere que la recuperación del calor no está siendo óptima, lo cual es un desperdicio de energía y dinero. La eficiencia en la generación es baja debido a los ajustes que implica transformar el proceso de fabricación de azúcar crudo en producción de meladura, el cual solo se requiere 31,65

t/h de vapor, que representan solo el 52,75 % de la capacidad nominal de la caldera. Se definen además 10 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.

3.2 Resultados de la integración según el Análisis del Pellizco

Se estableció un $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se aplicó el método del algoritmo de la tabla problema. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos con este método en *Microsoft Excel*.

Los requerimientos energéticos que resultan de este método son: $Q_{F\min} = 0$, $Q_{C\min} = 5\,917\text{ kW}$. El punto de Pellizco (T_p) se localiza en $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una temperatura caliente de $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura fría de $34\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La máxima recuperación de energía, gráficamente, es la región entre $Q_{F\min}$ y $Q_{H\min}$ y se determina mediante la diferencia de la energía disponible acumulativa de la corriente caliente ($492,94\text{ kW}$) y $Q_{F\min}$ (0), esto define un potencial energético recuperable de $492,94\text{ kW}$, mediante intercambio de calor entre corrientes del proceso.

En las figura 3 y 4 se muestra el diagrama de las curvas compuestas caliente y fría y la gran curva compuesta.

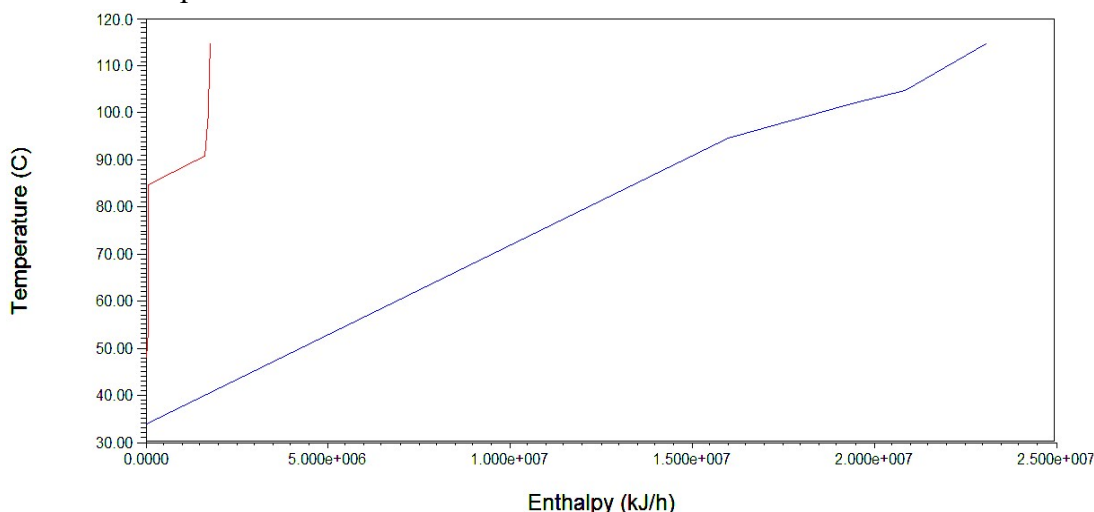


Figura 3. Curvas compuestas caliente y fría

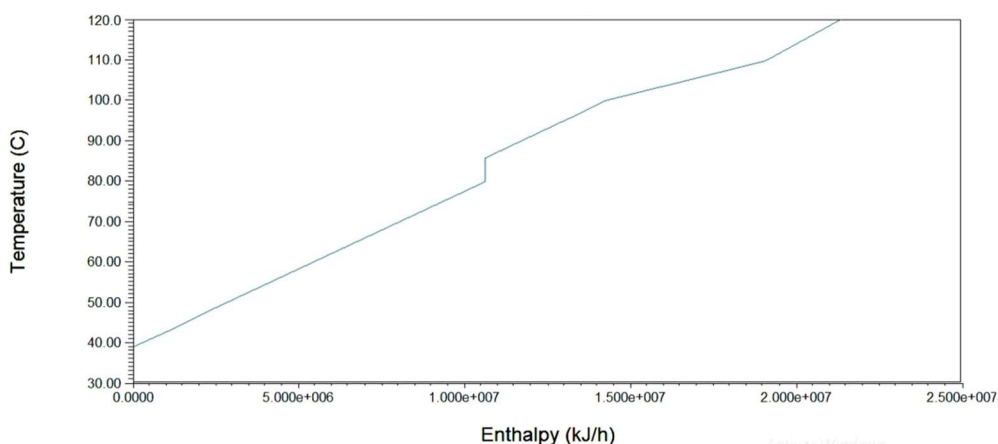


Figura 4. Gran Curva Compuesta

Tabla 5. Método del algoritmo de la tabla problema

<i>Intervalo</i>	<i>Corrientes</i>							<i>Temperatura Intervalo (°C)</i>	$\sum CP_{frio} - \sum CP_{caliente}$ <i>(kW/°C)</i>	$\Delta H_{intervalo}$ <i>(kW)</i>	ΔH_{imp} <i>(kW)</i>	ΔH_p <i>(kW)</i>
	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3					
0								120	0	0	0	5 918,39
1								110	62,08	620,08	-620,08	5 298,30
2								107	134,51	403,55	-1 023,64	4 894,74
3								100	134,51	941,63	-1 965,28	3 953,11
4								97	72,51	217,53	-2 182,81	3 735,57
5								95	70,09	140,18	-2 323,00	3 595,38
6								86	70,41	633,75	-2 956,75	2 961,63
7								85	-2,46	-2,46	-2 954,29	2 964,09
8								80	-0,04	-0,23	-2 954,05	2 964,33
9								49	72,83	2 257,83	-5 211,89	706,50
10								43	69,19	415,16	-5 627,05	291,33
11								39	72,83	291,32	-5 918,39	0

Después de determinar los mínimos requerimientos de calentamiento y enfriamiento y la máxima energía recuperable se realizó el diseño de la red de intercambiadores de calor con el empleo del *software Aspen Energy Analyzer*.

En la figura 5 se muestra el diagrama de la rejilla sobre el pellizco

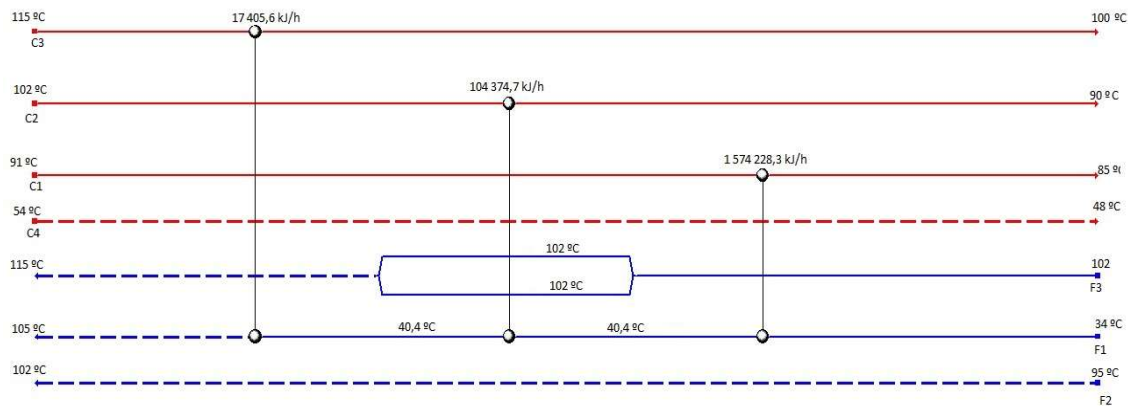


Figura 5. Diagrama de la rejilla sobre el pellizco

Se comprueba que $CP_C \leq CP_F$ (arriba del pellizco), por tanto, son posibles las combinaciones de las corrientes F₁ y C₁, F₁ y C₂, F₁ y C₃.

En las figuras 6a, 6b y 6c se muestran los datos de los intercambiadores de calor requeridos.

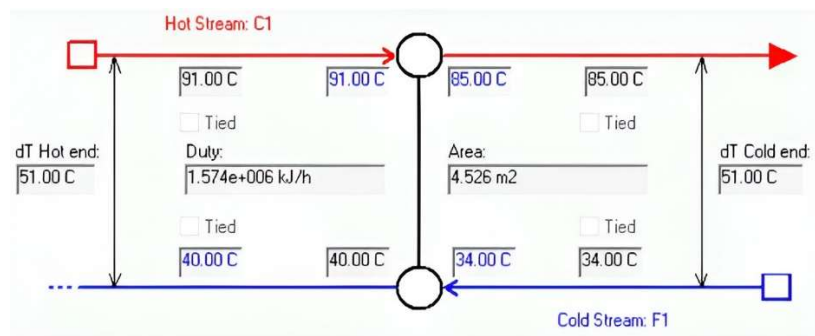


Figura 6a. Datos del intercambiador E-100

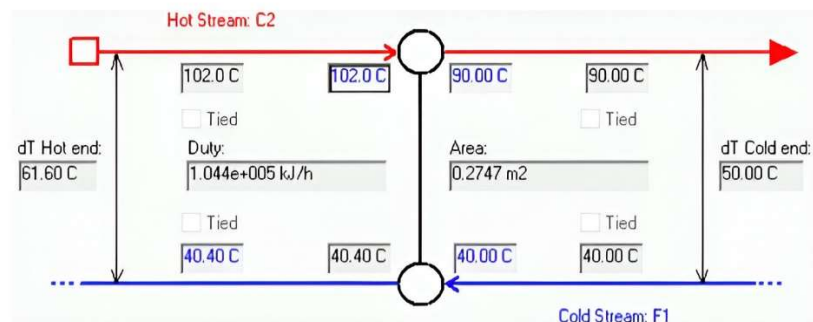


Figura 6b. Datos del intercambiador E-101

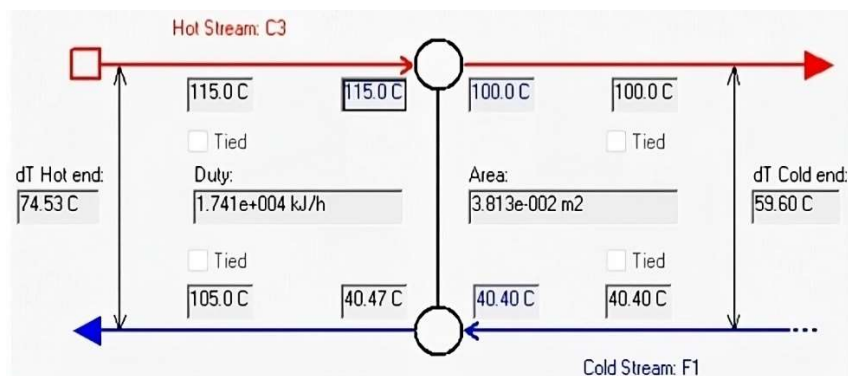


Figura 6c. Datos del intercambiador E-102

En los tres casos se fijan las corrientes C_1 , C_2 y C_3 para aplicar el balance de calor en cada intercambiador. Solo en el primer intercambiador se logra incrementar la temperatura de 34 °C a 40 °C. No se logra llegar hasta los 105 °C. Se logra recuperar 471,11 kW que constituye el 95 % de la MER, en intercambios de calor proceso-proceso.

En el diagrama de rejilla hay que añadir el calentamiento con vapor en las corrientes frías F_1 , F_2 y F_3 , y añadir el enfriamiento en la corriente C_4 .

La corriente F_1 demanda 5 172,22 kW de calentamiento y recupera con los tres intercambios 471,11 kW siendo la diferencia 4 701,11 kW. Las corrientes F_2 y F_3 demandan 1 240,27 kW que sumados a la demanda anterior, se alcanzan satisfacer el requerimiento mínimo de calentamiento.

Los ahorros potenciales de combustible y agua mediante la recuperación del calor de corrientes del proceso se consideran ingresos de recursos financieros para la evaluación de proyectos de inversión en el área de la energía (Klemeš, 2013). Los resultados obtenidos en este aspecto en el caso en estudio se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Ahorros potenciales

<i>Material</i>	<i>Ahorro</i>	
Combustible	300,76 t/año	162 414,59 \$/año
Agua	485 481,6 m ³ /año	364 111,2 \$/año

Como se puede apreciar con el diseño de la red de intercambiadores de calor se logra recuperar el 95 % de la MER en intercambios de calor proceso - proceso, que permiten lograr ahorros considerables de combustible y agua de enfriamiento tal y como se muestra en la tabla 6, que en términos económicos se traducen en un ahorro potencial de 526 525, 79 \$/año.

Esta recuperación de calor es fundamental para ganar eficiencia energética, permitiendo reutilizar el calor excedente en otros fines, como calefacción o generación de electricidad, lo cual es fácil y eficaz con una tecnología de intercambiadores de calor bien diseñada.

4. CONCLUSIONES

1. La producción de meladura presenta varios desafíos en cuanto a su desempeño energético, sin embargo, con una gestión adecuada de la recuperación del calor,

la optimización en la generación de vapor y la implementación de los diez indicadores propuestos se puede lograr una mejora considerable en la eficiencia energética.

2. Los resultados obtenidos mediante la construcción de la tabla problema indican que el proceso no requiere servicio de enfriamiento, mientras que necesita 492,94 kW de calentamiento, lo que da un potencial energético recuperable de 492,94 kW.
3. Con la implementación de los intercambiadores de calor se pueden recuperar 471,11 kW que constituye el 95 % de la MER, en intercambios de calor proceso-proceso.
4. La integración de procesos permite lograr ahorros considerables de combustible y agua de enfriamiento, que en términos económicos se traducen en un ahorro potencial de 526 525, 79 \$/año.

REFERENCIAS

- Aas, E. (2019). *Optimization of heat exchanger networks using Aspen Energy Analyzer and SeqHENS* [Tesis de maestría, Norwegian University of Science and Technology]. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-Heat-Exchanger-Networks-using-Aspen-Aas/0c0e24dc6d027c913ca24119bbdb9db503ef1f09>
- Almiral, J. (2009). *Temas de ingeniería eléctrica* (2ª ed.). Editorial Félix Varela.
- Cañizarez, G., Rivero, M., Pérez, R., & González, E. (2014). La gestión energética y su impacto en el sector industrial de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Tecnología Química*, 34(1), 11-23. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852014000100002
- Cruz, A., Pérez, O., Zumalacárregui, L., & Pérez, J. L. (2021). Integración energética del proceso de incineración de vinazas concentradas y generación de electricidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(6), 286-294. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000600286
- Espinosa, R., Hernández, J. P., Espinosa, J., & Castellanos, J. (2019). *Gestión energética eficiente y análisis de los sistemas auxiliares en las plantas químicas*. Editorial Félix Varela. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000300590
- González, R. (2020). *Matriz energética mundial y el cambio climático: Estado actual* [Tesis de maestría, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/15654>
- Hernández, J. P., Espinosa, R., Pérez, C., García, A. M., & García, A. (2020). Gestión energética en un central de azúcar crudo con uso del software STA 4.1. *Centro Azúcar*, 47(1), 77-89. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/171
-

- Hernández, J. P., Peralta, L. J., & Hernández, L. C. (2022). Evaluación del desempeño energético y la recuperación del calor en una refinería de azúcar. *Revista Cubana de Ingeniería*, 13(3), 1-11. <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/848>
- Hugot, E. (1986). *Handbook of sugar cane engineering*. Elsevier Science Publisher.
- ISO 50001. (2019). International Organization for Standardization. *Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*. Oficina Nacional de Normalización. http://www.nonline.cubaindustria.cu/index.php?page=m_home_page.public.home_page&Block=Inicio
- Iturralde, L. A., Monteagudo, J. P., & Castro, N. A. (2021). La eficiencia energética y la competitividad empresarial en América del Norte. *Universidad y Sociedad*, 13(5), 479-489. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2258/2231>
- Klemeš, J. J. (2013). *Handbook of process integration (PI): Minimisation of energy and water use, waste and emissions*. Woodhead Publishing.
- Mendieta, O. A., & Escalante, H. (2013). Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 113-127. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-87062013000200002
- Rosales, Y., Clavelo, D., Morales, M., & González, M. (2020). Modificaciones en el esquema de evaporación para reducir los consumos de agua y energía en un central azucarero. *Centro Azúcar*, 47(1), 43-52. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/168
- Smith, R. (2016). *Chemical process design and integration*. John Wiley & Sons.
- Visval, E., & Proaño, J. (2014). *Análisis de integración energética por el método pinch de la unidad de destilación primaria de la refinería de Talara - Perú* [Trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio institucional. <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/7caaa600-7785-4748-8d8b-d02b48316d32/content>
- Zhu, F. (2014). *Energy optimization for the process industries*. John Wiley & Sons.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Lisandra Guevara Orozco. Redacción - revisión y edición.
- Ing. Claudia Guirola Céspedes. Software.
- Dr.C. Juan Pedro Hernández Touse. Gestión de proyectos, supervisión.