

Evaluación del desempeño energético en central azucarero Heriberto Duquesne

Energy performance analysis at Heriberto Duquesne sugar mill

Juan Pedro Hernández Tousest¹<https://orcid.org/0000-0002-0032-8685>

Jorge Guevara Rodriguez²<https://orcid.org/0009-0009-7436-5233>

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

²Empresa Agroindustrial Azucarera Heriberto Duquesne, Remedios, Villa Clara.
Cuba

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

RESUMEN

Uno de los problemas identificados en la industria azucarera es la deficiente gestión de la ciencia e innovación. El objetivo de la investigación es determinar los ahorros potenciales de bagazo, fuel oil, vapor y agua en el proceso de producción de azúcar crudo, mediante la gestión de la energía, para incrementar los indicadores de eficiencia energética. Se aplica un procedimiento que incluye las metodologías de análisis del uso de la energía basado en la revisión energética según norma ISO 50001. La determinación de 12 indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados para esta industria, contribuyen a la definición de una línea base energética y a la medición sistemática de la eficiencia en la industria. La eficiencia térmica general, con un valor de 77 % está afectada por las pérdidas de calor en el proceso, asociadas a la recuperación del calor de corrientes calientes, fugas y aislamiento, las cuales se

pueden reducir con integración energética para la identificación del potencial de recuperación del calor. Las modificaciones realizadas en el sistema energético son de inmediata recuperación económica, dados los significativos ahorros potenciales de bagazo en el central y combustible en la destilería.

Palabras clave: azúcar de caña; central azucarero; gestión de la energía.

ABSTRACT

One of the problems identified in the sugar industry is the deficient management of science and innovation. The objective of the research is to determine the potential savings of bagasse, fuel oil, steam and water in the raw sugar production process, through energy management, to increase energy efficiency indicators. A procedure is applied that includes the analysis methodologies of energy use analysis based on the energy review according to ISO 50001. The determination of 12 energy performance indicators, currently not reported for this industry, contribute to the definition of a line energy base and the systematic measurement of efficiency in industry. The general thermal efficiency, with a value of 77%, is affected by heat losses in the process, associated with heat recovery from hot streams, leaks and insulation, which can be reduced with energy integration to identify heat recovery potential. The modifications made to the energy system are of immediate economic recovery, given the significant potential savings of bagasse at the sugar mill and fuel at the distillery.

Keywords: cane sugar; sugar mill; energy management.

Recibido: 15/01/2023

Aceptado: 18/04/2023

Introducción

Uno de los problemas identificados en la industria azucarera es la deficiente gestión de la ciencia e innovación, así, en las proyecciones del grupo azucarero AZCUBA ⁽¹⁾ hasta el año 2024 se declara elevar la eficiencia industrial y energética y disminuir la carga contaminante al medioambiente. El uso eficiente de la energía es una necesidad imperativa para mejorar la competitividad y la rentabilidad en las industrias de procesos.⁽²⁾

La viabilidad económica de las fábricas de azúcar crudo se puede mejorar generando ingresos adicionales de otras fuentes. Una ventaja económica sustancial de usar vapor o electricidad generados en las fábricas de azúcar crudo a partir del bagazo, en otras industrias in situ, son los créditos de energía renovable asociados a esta energía a través del desplazamiento de combustibles fósiles que de otro modo se habrían consumido. ⁽³⁾.

Al analizar la evolución quedó claro que la industria azucarera ha tenido en la energía su factor clave de desarrollo tecnológico. Las necesidades de una exigencia sistemática de eficacia, la impulsaron a asegurar sistemas más eficientes energéticamente, la transformación de la tecnología, el aumento de rendimientos y la obtención de azúcar de mayor calidad.⁽⁴⁾

Independientemente del hecho de que la mayoría de las plantas son autosuficientes energéticamente, los equipos tradicionales en sus unidades de cogeneración no están permitiendo producción excedente de energía para la venta a la red. En la actualidad existe una conciencia creada sobre la ventaja de tener sistemas de cogeneración más eficientes con el fin de mejorar la generación de energía y así poder producir energía excedente. Los ingenios azucareros tradicionales sin exportación de la energía eléctrica a la red generan generalmente 10-20 kWh energía/tc y consumen 480-550 kg vapor/tc. Los ingenios azucareros modernos con instalaciones eficientes del sistema de cogeneración generan energía eléctrica en el rango de 115-120 kWh/tc.⁽⁵⁾

Las medidas de mejora de la eficiencia energética en ingenios azucareros han sido y continúan siendo críticas tanto para la cogeneración como en las unidades de procesamiento de azúcar/etanol. En la práctica, se ha prestado mayor atención a la cogeneración, aunque varios estudios han ilustrado claramente los beneficios

de las medidas en el lado del proceso. Algunas de las posibles mejoras incluyen la siguientes (ISO).⁽⁶⁾ reducción del consumo de vapor en los cristalizadores, instalación de tachos continuos, instalación de difusores de caña en lugar de rodillos de molino, aumento en el número de efectos de evaporadores múltiples, y uso de máxima extracción de vapor en múltiple efecto evaporador. Los ingenios azucareros tradicionales tienen un mayor consumo de vapor debido a la baja eficiencia de las turbinas de vapor mecánicas que se pueden mejorar mediante el reemplazo con accionamientos eléctricos. El tamaño de un ingenio azucarero y el consumo de energía mecánica no son necesariamente proporcionales. La modernización de la unidad de cogeneración de un ingenio azucarero con el fin de producir excedentes de energía no siempre puede ser factible debido, entre otros, a la estacionalidad de la producción de caña de azúcar y los mayores costos asociados con los equipos modernos. Teniendo en cuenta el menor costo de producción de electricidad de bagazo que de otras fuentes de energía, debe haber una clara motivación para producir electricidad a partir de la caña de azúcar para exportar a la red nacional.⁽⁷⁾

Con frecuencia, tanto en la literatura como en los estándares internacionales, el consumo específico de energía (CEE) se utiliza como un indicador de desempeño energético para evaluar o medir el desempeño de la eficiencia energética.⁽⁸⁾ Aunque varios estudios de investigación han adoptado SEC como un indicador del progreso de la eficiencia energética mejorada, las publicaciones sobre evaluaciones críticas cuando se usa el CEE son escasas. La variable que caracteriza el uso de energía por producto producido y expresada como una relación de unidades termodinámicas por unidad física a menudo se denomina en la literatura como consumo específico de energía.^(9,10)

A pesar de la conveniencia de usar el CEE, se han señalado varios desafíos en la literatura. Algunas dificultades citadas por algunas referencias son: limitada disponibilidad pública de datos de producción, capacidad y energía,⁽¹¹⁾ complejidad de los procesos integrados,⁽¹²⁾ particionamiento de productos⁽⁹⁾, disponibilidad y calidad de la información⁽¹³⁾ y la variación en el tiempo en el país y en otros países⁽¹⁴⁾ para la evaluación comparativa.

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.⁽¹⁵⁾

El sistema termoenergético del central presenta deficiencias tecnológicas que afectan los indicadores de eficiencia; a esto se añade poca rigurosidad y sistematicidad en la evaluación del desempeño energético, factores que limitan la determinación del potencial para la conservación de la energía y mejor aprovechamiento de los recursos energéticos en la producción de azúcar crudo y derivados en la biorrefinería.

La novedad de esta investigación reside en la aplicación en una forma comprensiva, de un procedimiento de análisis del uso de la energía para la determinación de las demandas y ahorros potenciales de energía y agua, y la definición de indicadores de desempeño energético. El objetivo de la investigación es determinar los ahorros potenciales de bagazo, fuel oil, vapor y agua en el proceso de producción de azúcar crudo, mediante la gestión de la energía, para incrementar los indicadores de eficiencia energética.

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 ^(16,17) y el procedimiento de análisis del uso de la energía, ⁽¹⁸⁾ que constituyen las principales actividades de la revisión energética, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns).

Las principales actividades realizadas en la revisión energética fueron: (1) análisis del uso y consumo actual de la energía, (2) evaluación del desempeño energético actual. El estudio incluye además, (3) la determinación del ahorro de recursos

energéticos para mejorar el desempeño energético y (4) la evaluación técnica y económica de la factibilidad de modificaciones en el esquema termoenergético.

Resultados y discusión

Análisis del uso y consumo actual de la energía

El central azucarero tiene capacidad de molienda de 2700 t/d. El sistema termoenergético está constituido por un generador de vapor con una capacidad de 60 t/h a partir de bagazo. El vapor sobrecalentado a 1,34MPa es consumido por 2 turbogeneradores de 1,5 MWy 2,5 MW a contrapresión y una válvula reductora. El vapor de escape a 0,218 MPa es consumido por el primer efecto del cuádruple efecto evaporador. En los evaporadores, calentadores y tachos se hace extracción de condensados contaminados para uso tecnológico.

Para el diagnostico energético se registran y analizan los consumos actuales (mínimo tres meses) de materia prima, recursos energéticos (electricidad, agua) y producción.

En la figura 1 se muestran los reportes de consumos de electricidad, molienda, consumo de agua, flujo de residuales, cachaza, concentración del jugo mezclado y de la meladura en el mes de febrero de 2022.

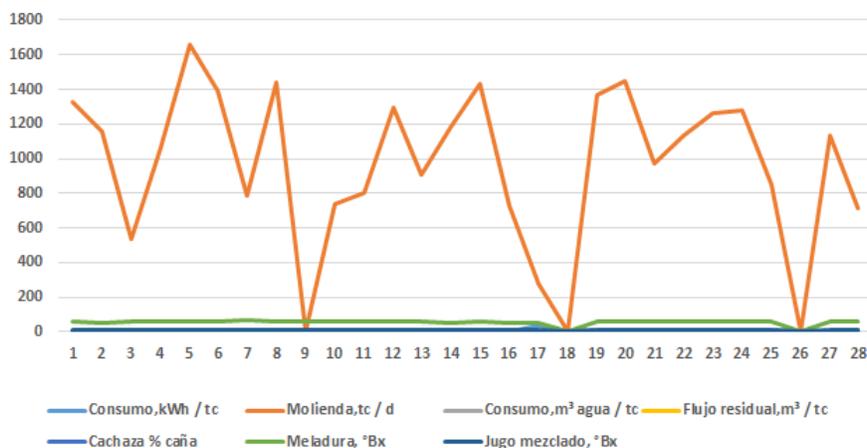


Fig. 1-Reportes de parámetros de operación

En el periodo reportado se observa que la molienda máxima es de aproximadamente 1600 t/d. La figura 2 muestra los reportes de flujos y temperatura del jugo mezclado y presión de vapor de escape en un día de operación, la figura 3 la presión del vapor de escape y la figura 4 el nivel del tanque y flujo de jugo mezclado en m³/h; de los cuales se toma el valor medio. que se obtienen del sistema de supervisión y control de procesos EROS, utilizados para la aplicación de los balances de materiales y energía.

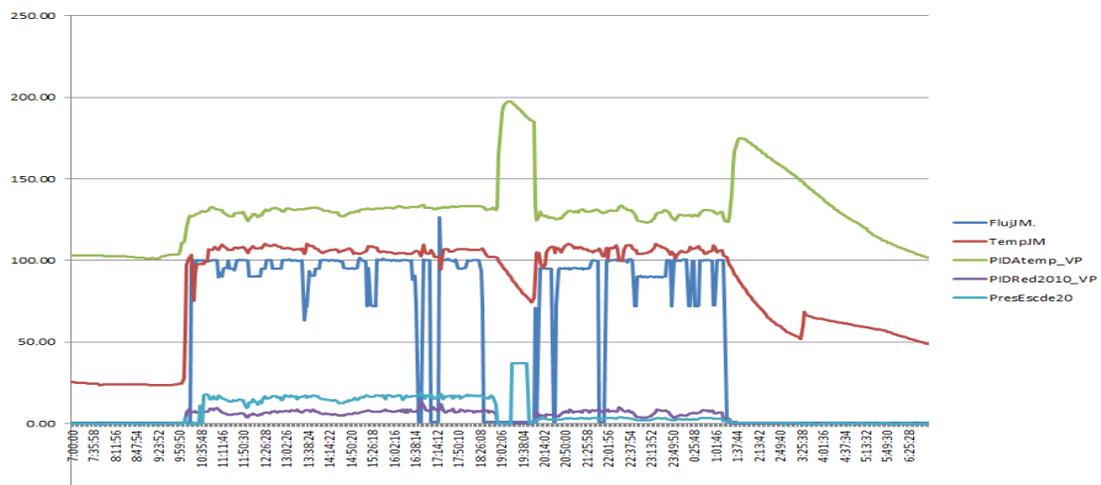


Fig.2-Registro manual de los reportes de operación



Fig.3- Presión del vapor de escape

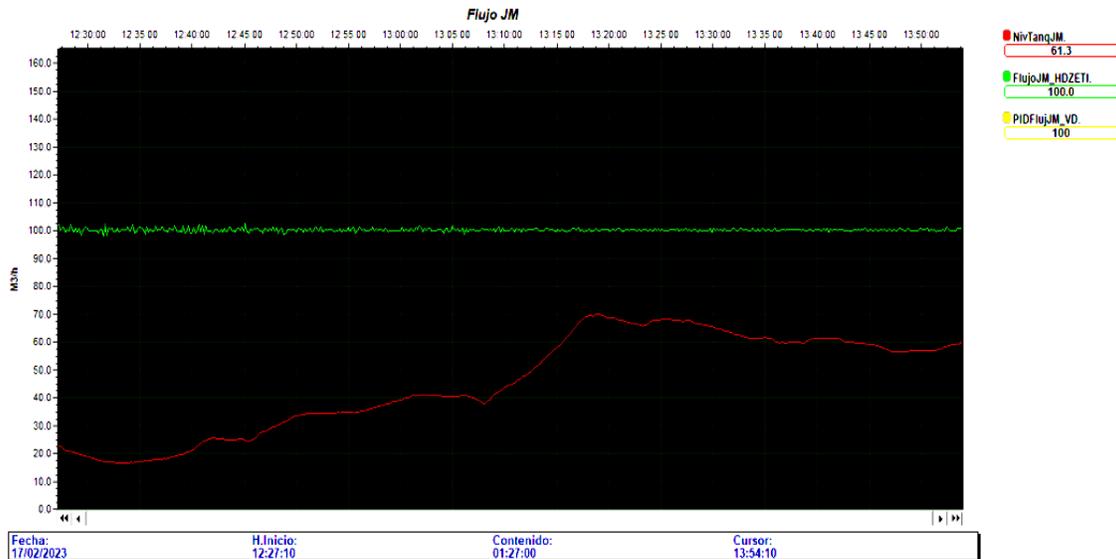


Fig.4- Nivel del tanque y flujo de jugo mezclado

Evaluación del desempeño energético actual

La evaluación del desempeño energético actual incluyó la aplicación de los balances de materiales en etapas de molienda, purificación, evaporación y cristalización. La ecuación (1) representa el balance total en los molinos. Se determina el flujo de jugo(J), bagazo (B), a partir de la información de zafra que incluye: caña molida (C), bagazo % caña, % de extracción en los molinos, agua de imbibición (A), % de fibra en caña. El flujo de jugo clarificado (JC) está dado por la ecuación (2) determinado por la suma de jugo mezclado (JM), jugo de los filtros (JF) y lechada de cal (LC) en la proporción de 2 % del JM.

$$C+A=B+J \quad (1)$$

$$JC=JM+LC+JF \quad (2)$$

El balance de vapor se aplica en equipos consumidores (turbogenerador, evaporadores, calentadores y tachos). El flujo de vapor por la válvula reductora (G_{VR}) está dado por la ecuación (3) 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 son dos turbogeneradores (G_{TG}). Otros consumos de vapor de alta

presión (G_{otros}) se estiman por la ecuación (4). La demanda de vapor (G_{cald}) se determina por la ecuación (5).

$$G_{\text{VR}} = G_{\text{NT}} - G_{\text{TG}} \quad (3)$$

$$G_{\text{otros}} = 0,03 \cdot G_{\text{TG}} \quad (4)$$

$$G_{\text{cald}} = (G_{\text{VR}} + G_{\text{TG}} + G_{\text{otros}}) \cdot 1,05 \quad (5)$$

En el balance de agua se asume que G_{cald} es igual a la cantidad vapor condensado (G_{acald}). La disponibilidad de condensados puros (G_{apuros}) solo se obtiene del primer efecto evaporador (G_{efecto1}) y los flujos de condensados contaminados G_{acont} provienen de los calentadores (G_{acal}), segundo, tercer y cuarto efecto evaporador y tachos (G_{atachos}) El agua de reposición (G_{aguarep}) está dada por la ecuación (6).

$$G_{\text{aguarep}} = G_{\text{acald}} - G_{\text{apuros}} \quad (6)$$

Mediante el balance de calor se determina la potencia térmica requerida por el proceso (Q_{cald}), expresada en kW y dada por la ecuación (7), en la cual intervienen el calor del turbogenerador (G_{TG}), calor de las necesidades tecnológicas (Q_{NT}), otros calores de vapor de alta presión (Q_{otros}) y el calor del condensado recuperado (Q_{cond}). Por tanto, de esta ecuación se obtienen las pérdidas de calor (Q_{perd}).

$$Q_{\text{cald}} = G_{\text{cald}} \cdot i_0 = (Q_{\text{TG}} + Q_{\text{NT}} + Q_{\text{otros}} + Q_{\text{cond}}) + Q_{\text{perd}} \quad (7)$$

Tabla 1- Información general de zafra

Caña molida t/zafra	% agua imbibición	Bagazo % caña	Cachaza % caña	Lechada de cal m ³ /h	% fibra en caña
123.287	20	34,857	3,731	2,05	18,795

El consumo de combustible está dado por la ecuación (8), donde VCN es el valor calórico neto del bagazo con un valor de 6900 kJ/kg. La eficiencia térmica general y la eficiencia de la generación están dada por las ecuaciones (9) y (10), donde G_{nom} es la capacidad de diseño de la caldera.

$$\text{Consumo de combustible} = \frac{Q_{cald}}{VCN_{comb}} \quad (8)$$

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{Q_{cald} - Q_{perd}}{Q_{cald}} \cdot 100 \quad (9)$$

$$\text{Eficiencia de generación} = \frac{G_{cald}}{G_{nom}} \cdot 100 \quad (10)$$

La tabla 2 muestra los resultados de los balances (masa, vapor, agua, calor). Como se observa, existe un sobrante de bagazo que se entrega a un central azucarero cercano, sin embargo, el excedente real es menor debido al gasto de bagazo asociado a las pérdidas de calor.

Tabla 2- Resultados de los balances de materiales, vapor, agua y calor

Balance de materiales	
Flujo de jugo clarificado, t/h	115,327
Bagazo disponible, t/ zafra	94114
Bagazo quemado, t/zafra	60080
Bagazo sobrante, t/zafra	34034
Bagazo consumido por pérdidas de calor, t/zafra	13808
Bagazo sobrante real, t/zafra	20225
Balance de vapor	
Consumo de vapor del turbogenerador, t / h	51,82
Demanda total de vapor, t / h	57,13
Balance de agua	
Condensados puros, t / h	56,83
Condensados disponibles al proceso, t / h	62,00
Agua de reposición, t / h	0,3
Balance de calor	
Demanda de potencia térmica, MW	47,48
Pérdidas de calor, MW	11

La demanda de vapor es de 57,13 t/h. Solo se reponen 0,3 m³/h de agua a caldera, y una potencia térmica requerida por el proceso de 47,48 MW. El

consumo de vapor está muy cercano al valor nominal de la caldera, por tanto, muy limitada para satisfacer el consumo de vapor. Adicionalmente, la destilería requiere 10 t/h, combinando vapor de escape y extracción de primer efecto evaporador.

En la tabla 3 se muestran los indicadores de eficiencia calculados y reportados.

Tabla 3- Indicadores de desempeño energético

Indicadores	Calculado	Reportado ⁽¹⁶⁾
Consumo específico de vapor, t vapor / t caña	0,5	
Consumo específico de vapor, t vapor / t bagazo	2,23	
Consumo de vapor de baja presión % caña	35,74	
Consumo específico de vapor turbogeneradores, tv / MWh	14,37	
Consumo específico de bagazo, t bagazo / MWh	6,41	
Generación electricidad, kWh / t caña	34,66	
Consumo específico de energía térmica, MJ / t caña	1535,38	
Vapor por válvula reductora, %	0	≤15
Agua de reposición, %	0,84	≤15
Pérdidas de calor, %	23,00	≤ 5
Eficiencia térmica, %	77,01	90-95
Eficiencia de la generación, %	93,41	95-100

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 del primer efecto evaporador. El análisis termoenergético realizado coincide con el estudio del ICIDCA mediante la aplicación de balances LERB.

Se definen 12IDEns 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.

Determinación del ahorro de recursos energéticos

Las pérdidas de recursos energéticos y financieros están dadas por el agua de reposición a caldera, el bagazo gastado por pérdidas de calor (desaprovechamiento del calor sensible en el condensado, purgas, fugas y ausencia de aislamiento) y combustible consumido en destilería en tres meses. En el análisis económico se asume un valor calórico neto del bagazo de 6900 kJ/kg,

100 días de operación al año, 24 horas/día y precios del bagazo y fuel oil de 130CUP/t y 184 CUP/L, respectivamente.

En la tabla 4 muestran los ahorros potenciales de bagazo, asociados a los gastos actuales de bagazo por pérdidas de calor. Los ahorros de fuel oil están dados por el uso de vapor de escape y extracciones del primer efecto del central, en la destilería de alcohol. Se asume el consumo medio de fuel oil en un mes.

Tabla 4- Ahorros potenciales de combustible

Gasto de bagazo (t/zafra)	Fuel Oil (L)	CUP/zafra
13 808	-	1 795 040
-	400 000	73 600 000
Total		75 395 040

Evaluación técnica y económica de la factibilidad de modificaciones en el esquema termoenergético

De forma paralela a la evaluación de uso de la energía en el central, se han realizado modificaciones al esquema termoenergético que aportan beneficios a la eficiencia energética, aunque se mantienen las pérdidas de calor, que significan consumos adicionales de bagazo. En la tabla 5 se muestran las modificaciones, la mayoría ya ejecutadas y los costos, donde los elementos de costo son gastos en materiales y mano de obra, estimados a precios actuales.

Tabla 5- Modificaciones en la base energética de la industria y costos

Modificaciones	Costos, CUP
1. Restauración de las columnas hidrodinámicas en el sistema de condensado del primer y segundo efecto evaporador.	20 000
2. Diseño e instalación de sifa hidráulica para sello barométrico de presión y nivel en el tanque de agua de alimentación a caldera	30 500
3. Diseño e instalación de tubería para extracción de vapor desde según efecto a los calentadores primarios.	10 600
4. Desmontaje del sistema de bombeo de tanques intermedios de condensados de segundo efecto y tachos,	18 000
5. Instalación de tuberías y válvulas para separación de condensados contaminantes de pre evaporadores.	36 000
6. Rehabilitación del sistema de muestreo del jugo para determinación de concentración (°Bx) en múltiple efecto evaporador.	1 800
7. Instalación de sistema de conexión de agua tratada de bombas de vacío a enfriadero.	36 900
8. Instalación de conexión de la extracción del primer efecto a calentadores de jugo clarificado.	19 300
9. Modificación de la extracción del segundo efecto a calentadores primarios.	19 900
Gastos totales	193 000

En la estimación de la factibilidad técnica y económica de las modificaciones se consideran como ingresos, los ahorros potenciales por pérdidas evitadas de calor en el proceso y el consumo de fuel oil en la destilería. En cuanto a inversión se consideran los gastos en las modificaciones. Teniendo en cuenta la magnitud de los ahorros y los gastos en las modificaciones es evidente una recuperación inmediata de los recursos financieros destinados a las modificaciones.

Los resultados del proyecto de rehabilitación del esquema energético han aportado los siguientes beneficios:

(1) aprovechamiento de la energía del agua y condensados para la alimentación a la caldera; (2) entrega de vapor a destilería; (3) incremento de la eficiencia de evaporación; (4) incremento de la temperatura de agua de alimentación a caldera; (5) ahorro de combustible en destilería; (6) ahorro de bagazo en el central azucarero; (7) ahorro de agua tratada; (8) incremento en el rendimiento de la producción de azúcar; (9) incremento en la productividad; (10) disminución de las interrupciones en la operación.

Conclusiones

1. La determinación de 12 indicadores de desempeño energético, actualmente no reportados para esta industria, contribuyen a la definición de una línea base energética y a la medición sistemática de la eficiencia en la industria.
2. La eficiencia térmica general, con un valor de 77 % está afectada por las pérdidas de calor en el proceso, asociadas recuperación del calor de corrientes calientes, fugas y aislamiento, las cuales se pueden reducir con integración energética para la identificación del potencial de recuperación del calor.
3. Las modificaciones realizadas en el esquema termoenergético son de inmediata recuperación económica, dados los significativos ahorros potenciales de bagazo y agua en el central y combustible en la destilería.

Referencias bibliográficas

1. GRUPO AZUCARERO AZCUBA. Proyección estratégica [en línea]. [Consultado 26 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.azcuba.cu/proyeccion-estrategica/#>
2. 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>
3. BROADFOOT, R. Planning changes to the process sections of raw sugar factories for increased cogeneration. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 2001, **23**, pp. 395—402. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 23: 395—402 ISSN 1743-3541
4. ALMAZÁN, O., Pérez, I. Integration of a Sugar mill, an Ethanol Distillery and a Single Cell Protein Plant Energetically. *J PollutEff Cont.*, 2022, **9** (12), pp.1-4 ISSN: 2375-4397 (online)
5. BIRRU, E. Sugar Cane Industry Overview and Energy Efficiency Considerations. Literature Survey document. KTH School of Industrial Engineering and Management. STOCKHOLM, 2016, pp. 1-61. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:905929/FULLTEXT02.pdf>
6. RAGHU, R.J. Banerjee, R. Energy and cogeneration targeting for a sugar factory. *ApplThermEng*, 2003, **23**(12), pp.1567–1575. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00101-7)
7. BIRRU, E., Erlich, C., Martin, A. Energy performance comparisons and enhancements in the sugar cane industry. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0349-z>
8. LAWRENCE, A., Thollander P., Andrei M., Karlsson, M. 2019. Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences. *Energies*. 12, 247, **22** p; doi: 10.3390/en12020247.

9. PATTERSON, M.G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 1996, **24**, 377–390.

https://www.researchgate.net/publication/222171789_What_is_energy_efficiency_Concepts_issues_and_methodological_issues/link/5ddf491d299bf10bc32bb19f/download

10. DE BEER, J.; Worrell, E.; Blok, K. Long-term energy-efficiency improvements in the paper and board industry. *Energy* 1998, **23**, 21–42

http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-2728-0_4

11. IEA (International Energy Agency). Tracking Clean Energy Progress; IEA: Paris, France, 2017 <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2017>

12. FARLA, J.; Blok, K.; Schipper, L. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry. *Energy Policy* 1997, **25**, 745–758

[https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00065-7)

13. SAYGIN, D.; Worrell, E.; Patel, M.K.; Gielen, D.J. Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries. *Energy* 2011, **36**, 6661–6673.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.025>

14. PHYLIPSEN, D.; Blok, K.; Worrell, E.; Beer, J. De Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: An assessment of the expected effect on energy consumption and CO₂ emissions. *Energy Policy* 2002, **30**, 663–679. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00023-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00023-X)

15. 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>

16. 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>

17. HERNÁNDEZ, J. P., Espinosa, R., Pérez, C., García, A.M., García, A., Gestión energética en uncentral de azúcar crudo con uso del software STA 4.1. *Centro Azúcar*, 2020. **47** (1) p: 77-89. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/>
18. 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>

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Juan Pedro Hernández Touse: conceptualización, metodología, redacción.

Jorge Guevara Rodríguez: conservación de datos, revisión, validación.