

Bombas de calor en evaporación, en centrales azucareros ¿sí o no?

Leopoldo Rostgaard-Beltrán, Juan A. Godefroy-Fernández, Abel Verdecia-Fonseca, Raúl Sabadí-Díaz*

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)

Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central. La Habana, Cuba

* raul.sabadi@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

Introducción. Una bomba de calor permite transferir calor de un medio frío a otro caliente, mediante un ciclo termodinámico. Existen aplicaciones de estos sistemas en la industria azucarera, principalmente en tachos; pero también en evaporación, con la utilización de recompresión del vapor térmica (TVR) o mecánica (MVR).

Objetivo. Estudiar la TVR en el sistema de evaporación de jugos de un central azucarero, con el fin de reducir la demanda de vapor del proceso y que las calderas puedan cubrirla.

Materiales y métodos. Se realizan balances de materiales y energía para cuatro escenarios, en un central azucarero con baja generación de vapor. Para ello se utiliza la aplicación LERB, adaptada para incluir bombas de calor, por recompresión térmica, en la simulación del sistema de evaporación.

Resultados y discusión. En el escenario en que se comprime vapor del último efecto, para usarlo en el primer vaso, se requiere electricidad de la red nacional, lo que lo hace no factible. En el escenario en que se comprimen 5 t/h de vapor del segundo efecto se exporta poca electricidad; pero se logra un aprovechamiento aceptable de la caldera del 87.57 %, con un consumo de vapor del 40.28 % en caña, que aún debe mejorar. Por otra parte, debido a la disminución de la demanda de vapor, la cantidad de bagazo necesario también disminuirá y sobrarán 33 toneladas por hora, de manera que se podrá producir más electricidad en los momentos de paradas. Esto compensa, de alguna forma, la disminución de generación eléctrica en operación.

Conclusiones. Se determinó el escenario más conveniente para el central azucarero estudiado. Se redujo la demanda de vapor del proceso y disminuyó el grado de explotación de las calderas. También disminuyó la generación eléctrica, pero se incrementó el bagazo sobrante, por lo que en paradas podría generarse más electricidad. Se deben continuar estudiando otras alternativas de TVR.

Palabras clave. Bomba de calor, recompresión, MVR, TVR.

ABSTRACT

Introduction. A heat pump allows heat to be transferred from a cold medium to a hot one through a thermodynamic cycle. These systems are used in the sugar industry, primarily in vacuum pans, but also in evaporation, using thermal vapor recompression (TVR) or mechanical vapor recompression (MVR).

Objective. To study the TVR in the juice evaporation system of a sugar mill, in order to reduce the steam demand of the process and allow the boilers to cover it.

Materials and methods. Material and energy balances are performed for four scenarios in a sugar mill with low steam generation. The LERB application, adapted to include thermal recompression heat pumps, is used for this purpose in the evaporation system simulation.

Results and discussion. In the scenario where steam from the last effect is compressed for use in the first vessel, electricity from the national grid is required, making it unfeasible. In the scenario where 5 t/h of steam from the second effect is compressed, little electricity is exported; however, an acceptable boiler utilization of 87.57% is achieved, with a steam consumption of 40.28% in sugarcane, which still needs improvement. Fur-

thermore, due to the decrease in steam demand, the amount of bagasse required will also decrease, resulting in a surplus of 33 tons per hour, allowing for increased electricity production during shutdowns. This partially compensates for the decrease in electricity generation during operation.

Conclusions. The most suitable scenario for the sugar mill was determined. Steam demand for the process was reduced, and the boiler utilization rate decreased. Electricity generation also decreased, but the surplus bagasse increased, meaning more electricity could be generated during shutdowns. Further study of other TVR (Time-of-Reduction) alternatives is needed.

Keywords Heat pump, recompression, MVR, TVR.

INTRODUCCIÓN

Una bomba de calor permite transferir calor de un medio frío a otro caliente, mediante un ciclo termodinámico. Existen aplicaciones de estos sistemas en la industria azucarera, principalmente en tachos; pero también en evaporación, que utilizan recompresión térmica del vapor (TVR) (1) o mecánica (MVR) (2, 3, 4). Esta tecnología es una de las principales estrategias de eficiencia energética en ingenios modernos.

La TVR se utiliza para reducir el consumo de vapor vivo en los tachos y, en menor medida, en los evaporadores de múltiple efecto para la concentración del jugo.

El proceso de termocompresión se produce mediante la mezcla de dos vapores en un eyector: uno de los vapores constituye el denominado fluido motriz o de alta presión; y, el otro, el fluido de arrastre o de baja presión. Las condiciones termodinámicas del vapor resultante quedan definidas por las características y las proporciones de los vapores que se mezclan. El eyector está constituido, básicamente, por una tobera de expansión, seguida de una cámara de mezclado y, finalmente, una sección de compresión. Es la tecnología más usada por su simplicidad, falta de partes móviles y robustez, así como menor costo de inversión. Muchos diseños modernos utilizan el vapor de escape (a media presión) de las turbinas de generación eléctrica como fluido motriz del termocompresor, para maximizar la eficiencia global de cogeneración.

La aplicación más común y rentable ocurre en los tachos (cocción) (5). El vapor que sale del tacho, que está a baja presión y temperatura, se recomprime con la utilización de un eyector (o termocompresor), que emplea vapor vivo de alta presión como fluido motriz. Se genera un vapor útil, de presión intermedia, que se recircula al mismo tacho o se envía a otro cuerpo y que reduce, significativamente, la necesidad de vapor nuevo de la caldera.

En evaporadores de múltiple efecto se aplica para recomprimir el vapor que sale del último efecto (el de más baja presión); el cual, normalmente, se envía al condensador barométrico y pierde su energía térmica (5). Al recomprimir este vapor, se eleva su presión y temperatura, que permite reinyectarlo como vapor de calefacción en el primer o segundo efecto, cerrar el ciclo y mejorar la economía térmica global del sistema de evaporación. Este ciclo recicla eficazmente el calor latente que, de otro modo, se desperdiciaría en un condensador y reduciría, drásticamente, la demanda de vapor vivo a alta presión, generado por las calderas de la planta.

El principal beneficio consiste en una reducción significativa del consumo total de vapor y de la demanda energética para el proceso de evaporación. Se reportan ahorros de entre un 20 y un 35 % en el consumo de vapor en la etapa de cocción/cristalización, gracias al uso de termocompresores en tachos. Al reutilizar el vapor, disminuye la carga de vapor que va al condensador y reduce también el consumo de agua de enfriamiento. Un menor consumo de energía se traduce, directamente, en una reducción de los costos operativos. Al minimizar la necesidad de quemar más combustible (bagazo) para producir vapor, el sistema puede reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de carbono. Los sistemas TVR pueden integrarse en sistemas de evaporadores multiefecto tanto nuevos como existentes, con cambios mínimos en el diseño.

Las casas de ingeniería que diseñan y construyen estaciones de evaporación completa suelen proponer esquemas con TVR integrada desde la fase de diseño. Los fabricantes líderes de equipos para la industria azucarera ofrecen soluciones integradas de evaporación, que incluyen la TVR como opción estándar o configurable y, cada vez más, ofrecen también sistemas de MVR para aplicaciones específicas de alta eficiencia (6, 7, 8).

En este trabajo se estudia la TVR en el sistema de evaporación de jugos de un central azucarero, con el objetivo de reducir la demanda de vapor del proceso y que las calderas puedan cubrirla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizan balances de materiales y energía para cuatro escenarios en un central azucarero que no produce azúcar, por baja generación de vapor en calderas deterioradas, para ello se utiliza la aplicación LERB (9), adaptada para incluir bombas de calor en la simulación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El central azucarero objeto de estudio ha tenido la intención de moler, diariamente, 5400 t de caña; pero le ha sido difícil, debido al estado técnico de sus calderas. Solo puede trabajar con dos de sus tres calderas y esto significa que, para la molienda deseada, la explotación media de las calderas existentes debería mantenerse por encima del 90 %, valor muy elevado por el estado técnico de estas. Para mejorar esta situación es preciso realizar este estudio y determinar cuánto es posible bajar la demanda de vapor si se implementa una bomba de calor apropiada en el evaporador.

Se estudian cuatro escenarios:

1. Estado actual de operación, con el cuádruple efecto existente, que servirá de referencia.
2. Operación de la fábrica, al hacer compresión térmica desde el segundo vaso con vapor vivo de calderas e ingresar la mezcla al primer vaso del cuádruple. Se comprimen 5 t/h de vapor desde esa posición.
3. Igual que el escenario 2, pero se comprimen 10 t/h de vapor.
4. Operación de la fábrica de forma similar al escenario anterior, pero ahora se toma vapor del último cuerpo, que es lo usual que se reporte en estos sistemas. Se toman o comprimen, térmicamente, 10 t/h de vapor de 16.7 kPa (25 pulgadas de vacío), con vapor vivo de calderas.

En las figuras de la 1 a la 4 se presentan los diagramas de generación y consumo de vapor de los escenarios planteados; y, seguidamente, la tabla 1 muestra los resultados de las principales variables de interés en cada escenario.

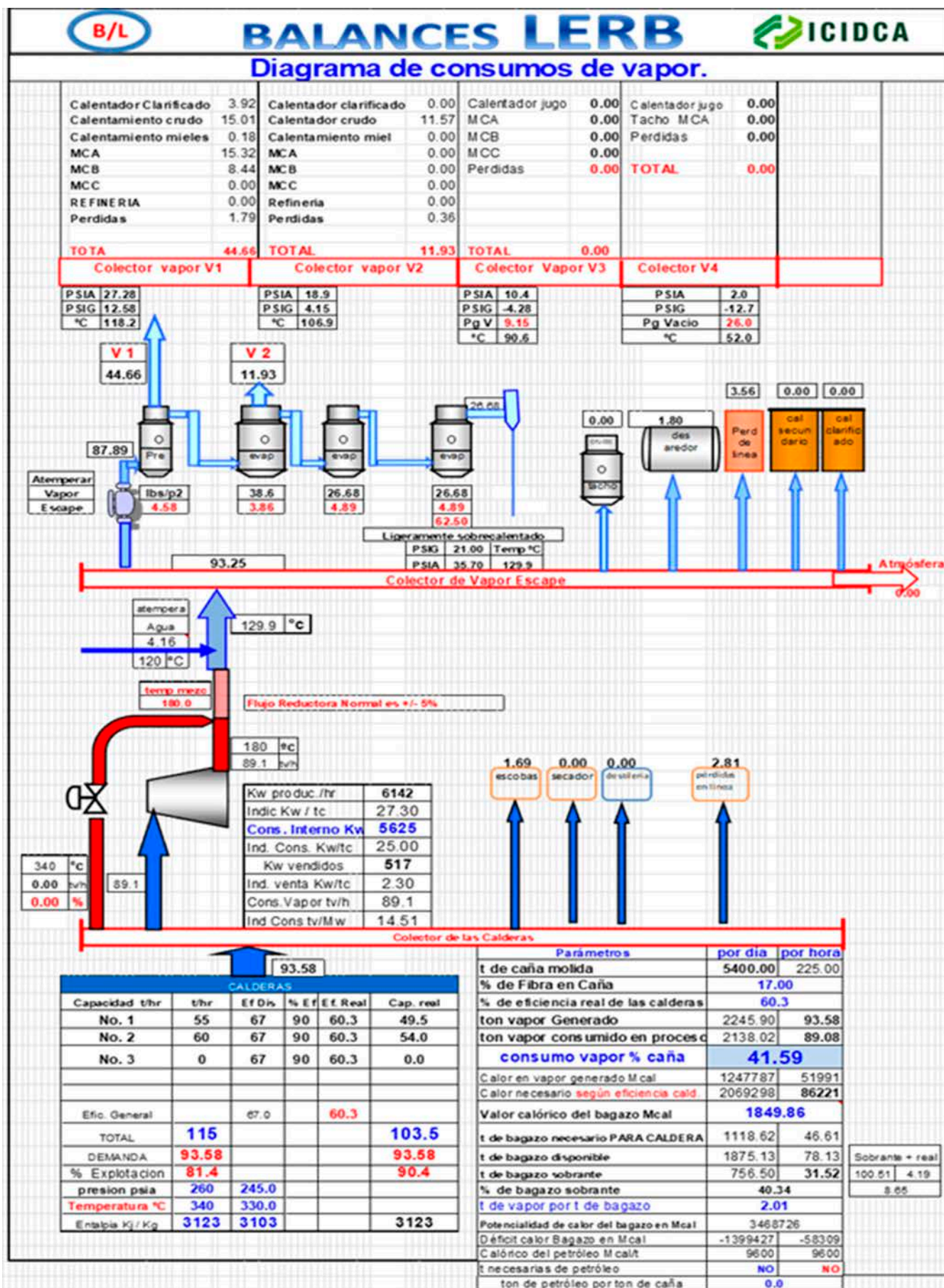


Figura 1. Diagrama de consumo de vapor para el escenario 1.

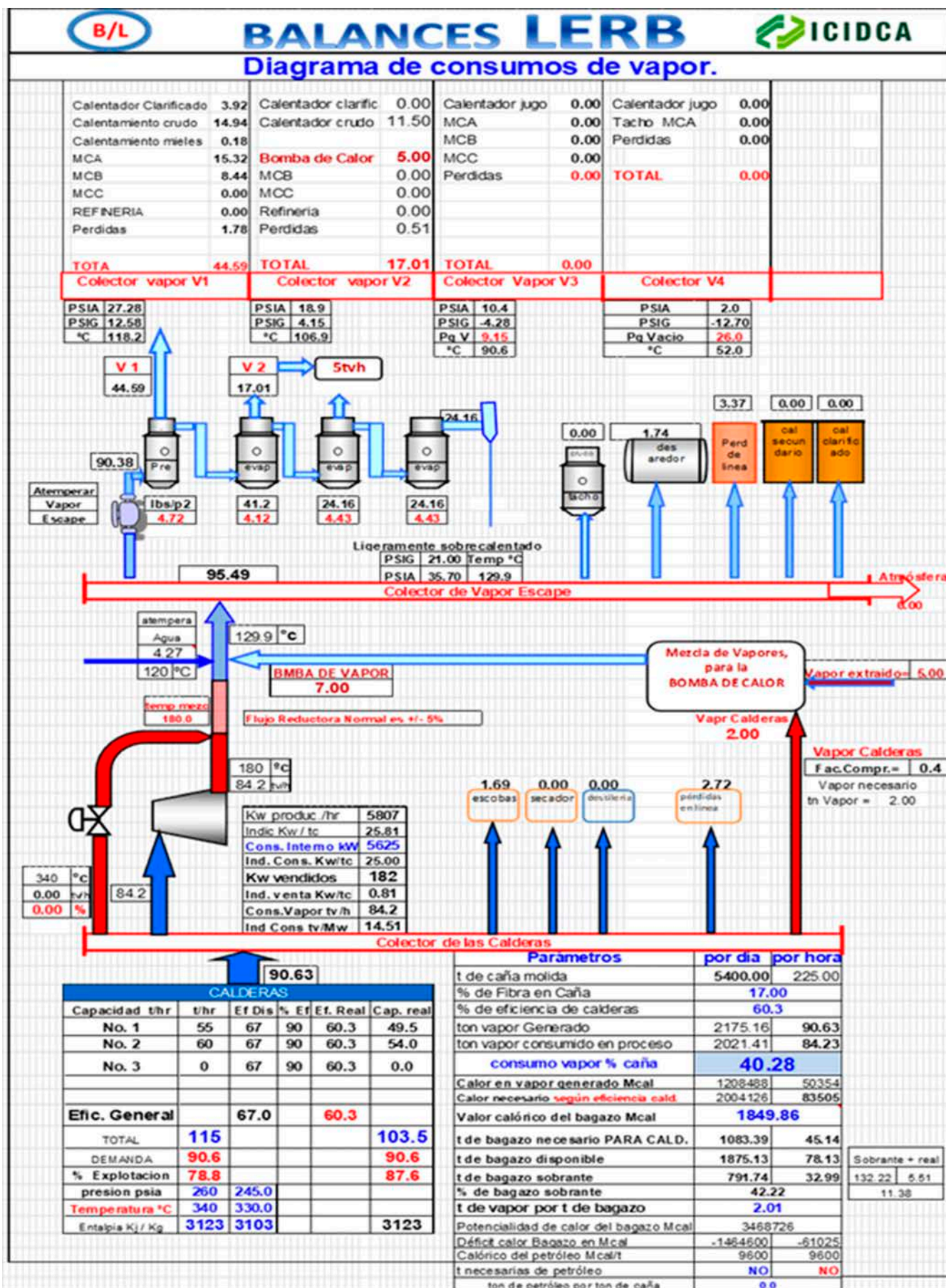


Figura 2. Diagrama de consumo de vapor para el escenario 2.

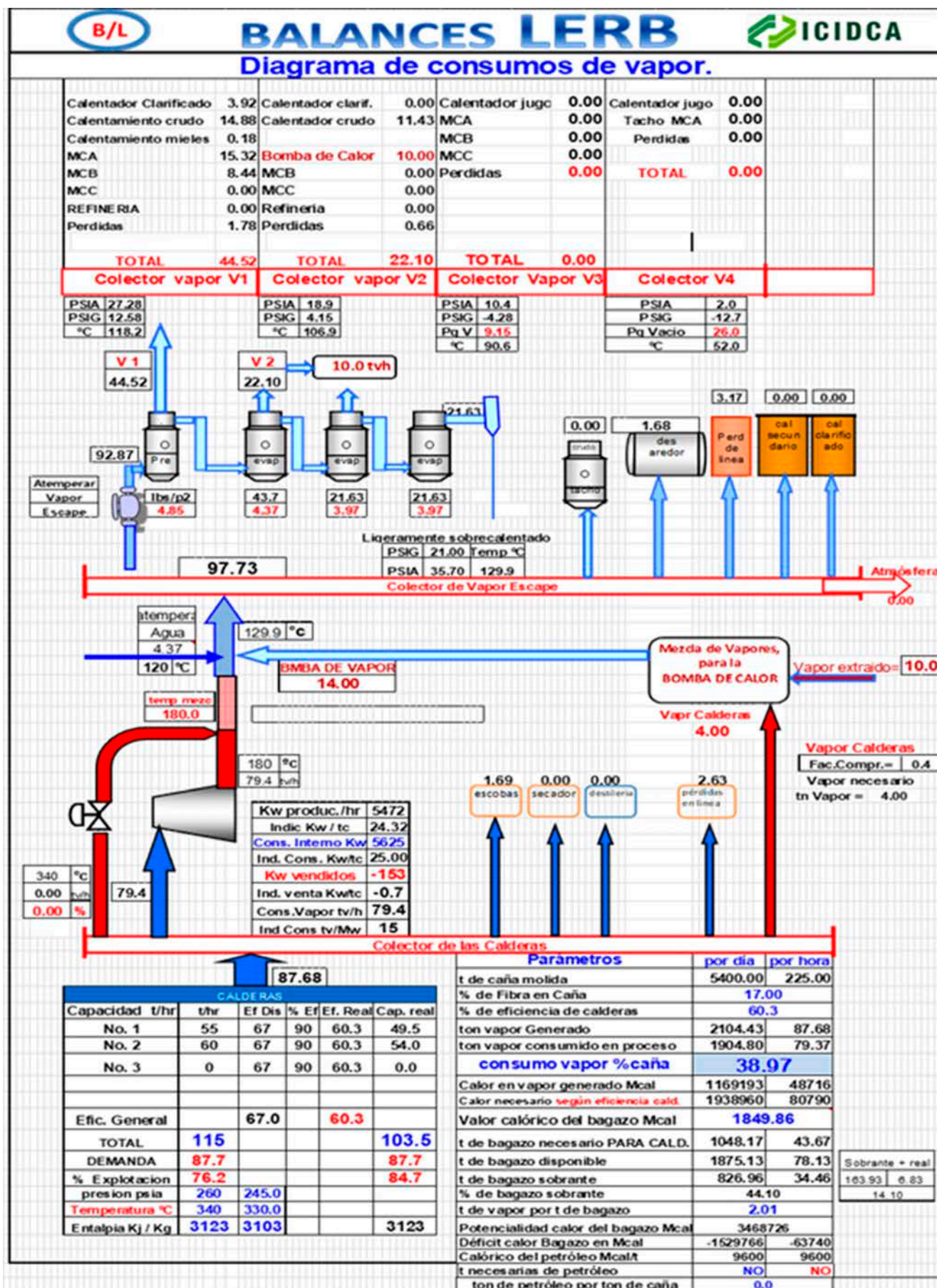


Figura 3. Diagrama de consumo de vapor para el escenario 3.

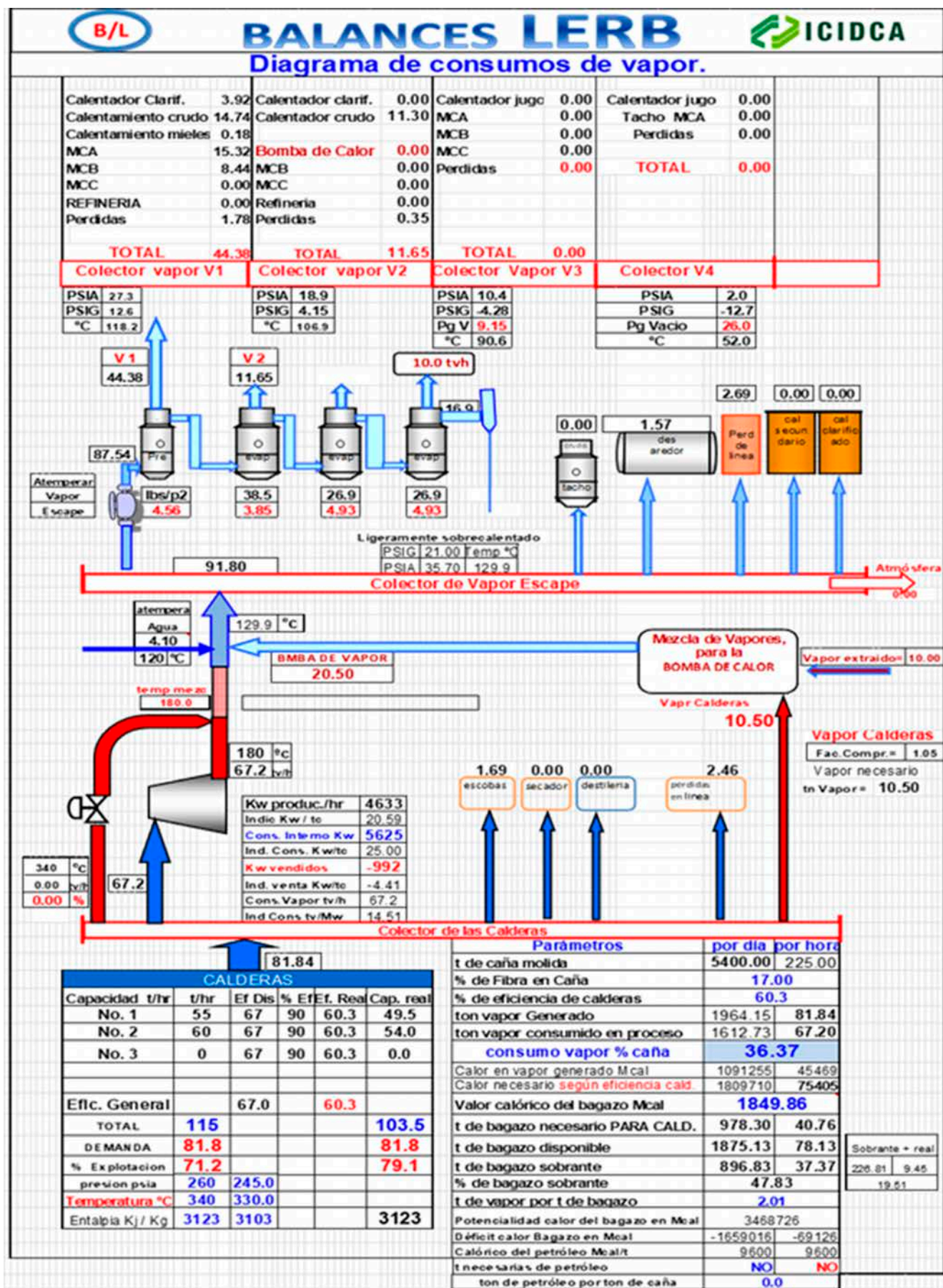


Figura 4. Diagrama de consumo de vapor para el escenario 4.

Tabla 1. Resultados para variables seleccionadas

Variabes	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Molida (t/h)	225.00	225.00	225.00	225.00
Bagazo producido (t/h)	80.71	80.71	80.71	80.71
Bagazo sobrante (t/h)	31.52	32.99	34.46	37.37
Capacidad de calderas (t/h)	103.50	103.50	103.50	103.50
Demanda de vapor (t/h)	93.58	90.63	87.68	81.84
Explotación de calderas (%)	90.41	87.57	84.72	79.07
Consumo de vapor (porcentaje en caña)	41.59	40.28	38.97	36.37
Generación eléctrica (kWh)	6142.00	5807.00	5472.00	4633.00
Venta de electricidad (kWh)	517.00	182.00	(153.00)	(992.00)

Evidentemente, se libera una carga importante de vapor demandado a las calderas. De una explotación del 90.41 %, en el caso de referencia, se puede disminuir la demanda global, que será proporcional a la cantidad de vapor termocomprimido y al tipo de vapor extraído, según el cuerpo en el que se realice. Si se pudiese tomar del último cuerpo, las calderas trabajarían con una explotación media del 79.0 % para la misma molida deseada de 5400 toneladas de caña por día.

Se debe resaltar que el factor de compresión varía según el vapor a comprimir. En este caso, en el primer escenario, el factor fue de 0.4 t de vapor de alta por t de vapor a comprimir; y, en el tercer caso, el factor cambió a 1.05 t de vapor vivo por t de vapor a comprimir.

Se evidencia que disminuye la producción de electricidad. Se debe analizar si para este central generar más electricidad, con el fin de venderla, es un objetivo importante; pero sin olvidar que se trata de que pueda trabajar, algo que no logra ahora por el estado de sus calderas. Aun en ese caso, las variantes 3 y 4 no resultarían convenientes, pues habría que tomar electricidad de la red nacional, 153 y 992 kWh, respectivamente.

En el escenario 3 se exporta poca electricidad, pero se logra un aprovechamiento aceptable de la caldera, del 80.52 %, con un consumo de vapor del 37.04 % en caña. Por otra parte, debido a la disminución de la demanda de vapor, la cantidad de bagazo necesario también disminuirá y el ahorro de este se incrementará y sobrarían 41.05 t/h, de forma tal que se podría producir más electricidad en los momentos de paradas, por disponer de más bagazo ahorrado. Esto compensaría, de alguna forma, la disminución de generación eléctrica en operación.

CONCLUSIONES

1. En los escenarios estudiados, el más conveniente sería el 2, que hace compresión térmica de 5 t/h de vapor, desde el segundo vaso con vapor vivo de calderas e ingresa la mezcla al primer vaso del cuádruple.
2. El uso de la bomba de calor reduce la demanda de vapor del proceso y disminuye el grado de explotación de las calderas hasta un 87.57 %; que, aunque no es aún el mejor valor, permite operar y producir azúcar.
3. Al disminuir la demanda de vapor de escape, disminuye la generación eléctrica, pero se incrementa el bagazo sobrante por lo que, en períodos de parada o inactividad, podría generarse más electricidad.
4. No existe una receta única para la utilización de las bombas de calor en centrales azucareros, por lo que cada caso particular requiere su análisis, de ahí que se deban estudiar otras alternativas que mejoren la economía de vapor.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el auspicio del proyecto nacional PN 3602 LH 002-059 (ICIDCA: 613), “Parques bioenergéticos en la agroindustria cubana de la caña de azúcar: una propuesta de modelo”, del PNCTI02 “Desarrollo de la Agroindustria de la Caña de Azúcar” (DACA).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Russo, M. N.; Diez, O. (2024). Recompresión de vapor como alternativa de ahorro de agua en los condensadores barométricos de un ingenio azucarero. RIAT, tomo 101(2):9-15; ISSN 0370-5404, <https://www.eeaoc.gov.ar/wp-content/uploads/2025/07/02-316.pdf>.
2. Amato, Virginia *et al.* (2020). SPIRIT Demonstration Case 2 - Integration of Heat Pump Technology in a Sugar Production Plant. High temperature heat pump Symposium. https://spirit-heat.eu/wp-content/uploads/2024/04/HTHP-Symposium_SPIRIT_DS3.pdf.
3. Verma, V.; Kumar Nanda, A.; Tiwari, R. (2022). Sugar Refinery based on Low Temperature Evaporation Technology using Mechanical Vapour Recompression System. SISSTA Proceedings 51st Annual Convention.
4. https://www.researchgate.net/publication/396464735_Mechanical_Vapour_Recompression_based_Low_Temperature_Evaporation_Technology_in_Sugar_Refinery.
5. Higa, M. *et al.* (2011). Heat recovery from multiple effect evaporator using vapor recompression. Proceedings of COBEM 2011. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering.
6. COSUM. Crystallization process with half the amount of gas: V-RISE. <https://www.cosun.com/climate/crystallization-process-with-half-the-amount-of-gas-v-rise/>.
7. Praj Industries. <https://www.praj.net/businesslines/zld-and-resource-recovery/>.
8. ADVEN. Maximized energy efficiency with MVR. <https://adven.com/industries/energy-efficiency/mvr-evaporation/>.
9. Chart Industries. Mechanical vapor recompression. <https://es.chartindustries.com/Products/Mechanical-Vapor-Recompression>.
10. Rostgaard, L. (2018). Balances LERB. Presentación en Fórum de Ciencia y Técnica. ICIDCA, La Habana, Cuba.