

Análisis de sitio total en un complejo bioeléctrica – central – destilería en Cuba

Liosdany Oliva-Pérez^{1*}, Junior Lorenzo-LLanes², Ivan A. García-González²

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).
Via Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* liosdany.oliva@icidca.azcuba.cu

3. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio que permite la utilización de forma eficiente de la energía generada en la industria azucarera. Se expone la necesidad de la modernización de los sistemas energéticos; así como la posibilidad de incrementar los actuales índices de generación eléctrica en los centrales azucareros de Cuba. Para ello se analizarán técnico y económicamente, alternativas que permitan la integración entre los procesos de bioeléctrica – central – destilería, utilizando las herramientas de simulación STA V4.1 y Aspen Pinch 11.1. A partir de la caracterización de las corrientes y la utilización de la herramienta de integración, sitio total, se logra un incremento de la eficiencia del complejo industrial. Obteniéndose una disminución de un 10.26 % de consumo de vapor de escape en el proceso de azúcar crudo. También se instalan un total de 30 MW. La alternativa seleccionada es el caso mejorado (CM) 3 debido a que engloba los CM 1 y CM 2. La TIR de un 32.9 % y VAN de 38 291 075 CUP para un costo de inversión de 40 415 870 CUP, lo que lo hace rentable.

Palabras clave: modernización, sistemas energéticos, sitio total, eficiencia.

ABSTRACT

In this work, an investigation is carried out that allows the most efficient use of the energy generated in the sugar industry. The need for the modernization of energy systems is exposed; as well as an assessment of the possibility of increasing current indices of electricity generation in sugar mills in Cuba. For this, alternatives that allow the integration between the processes of bioelectric - central - distillery will be analyzed technically and economically, from the simulation.

From the characterization of the streams and the use of the total site integration tool, an increase in the efficiency of the industrial complex is achieved. It was obtained a decrease in a 10.26 % in the consumption of exhaust steam in the raw sugar process. A total of 30 MW are also installed. The alternative selected is CM 3 because it includes CM 1 and CM 2. The TIR of 32.9 % and VAN of 38 291 075 CUP for an investment cost of 40 415 870 CUP, which makes it profitable.

Key words: modernization, energy systems, total site, efficiency.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un desequilibrio entre países ricos y pobres en lo que a consumo energético se refiere. Si a ello se suma la concentración de los recursos de combustibles fósiles en unos pocos lugares y que los grandes países productores y los consumidores se sitúan en lados opuestos del pla-

neta, resulta un escenario poco tranquilizador para el equilibrio sociopolítico mundial.

La energía es un problema global y para acatar las decisiones correctas, los gestores de estas deben mirar el panorama mundial y basar sus decisiones en un análisis de ciclo de vida completa y con información energética confiable (1, 2).

En Cuba la disponibilidad de los recursos tradicionales (combustibles fósiles) es escasa, además

no cuenta con la tecnología más adecuada para su obtención.

El uso eficiente de la energía es una de las principales estrategias para mejorar la competitividad en los procesos industriales (3). Es también una medida concreta, no sólo para la conservación de los recursos energéticos fósiles, sino también para el abatimiento de los impactos ambientales derivados de la producción y consumo de energía, como son entre otros la contaminación del aire y el cambio climático (4, 5).

La producción de azúcar y alcohol de nuestro país se ha caracterizado por consumir grandes cantidades de energía térmica. La necesidad de implementar un sistema más eficiente y moderno para minimizar este consumo en ambos procesos es inminente (6).

Mediante los controles realizados por el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) se tiene que alrededor del 40 % de los centrales no cumplen con la política de venta de energía al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). También un 15 % no tiene las condiciones creadas para garantizar la biomasa (bagazo, paja, marabú) para continuar cogenerando durante las paradas de molida (7).

Con la aplicación de técnicas de integración de proceso se han reportado ahorros de energía (8), que van desde un 6 % a un 60 % con respecto al diseño original. La disminución del costo de la inversión ha sido alrededor de un 30 % con respecto al diseño original (9). Con el uso de, sitio total, en la industria azucarera se ha logrado disminuir el consumo de vapor en un 34 % y en 37 % para casos diferentes (10).

La existencia de bioeléctricas generando cantidades crecientes de electricidad la mayor parte del año, es una necesidad de seguridad nacional que está aún por satisfacer, no obstante existe una firme voluntad política en el gobierno cubano (11).

Para el trabajo de las bioeléctricas vinculadas a centrales en tiempo inactivo hay que tener en cuenta el balance del central, siendo el bagazo disponible alrededor del 15 % (12), según datos del grupo azucarero cubano AZCUBA.

Los estudios encontrados en Cuba hasta el momento solo tratan del mejoramiento del rendimiento técnico del proceso de producción azucarera y alcohol o de la necesidad de incremento de la generación de electricidad (5, 8, 13). En la literatura consultada no se presenta un panorama general de la unión de estas áreas con diferentes objetivos, pero con una estrecha relación.

Con el desarrollo tecnológico estos estudios pueden llevarse a cabo de una manera rápida y flexible. El uso de la computación y la simulación vinculada a esta es el camino a transitar.

El objetivo que se persigue en este trabajo es proponer alternativas de integración basadas en el análisis de sitio total para el diseño conceptual de las plantas bioeléctricas que permitan incrementar la eficiencia energética en un complejo industrial bioeléctrica – central – destilería en Cuba.

MATERIALES y MÉTODOS

Se utilizan como herramientas fundamentales los simuladores STA 4.1 y Aspen Pinch 11.1. El STA 4.1 es un simulador cuyo objetivo es facilitar la evaluación de los sistemas termoenergéticos (STE) en fábricas de azúcar crudo (14).

La simulación en el Aspen Pinch 11.1 facilita realizar de manera eficaz un análisis energético del proceso en evolución o diseño, solamente con la introducción de las corrientes y su contribución energética. Con Aspen Pinch 11.1 se hace fácil la utilización del sitio total que es extendida para considerar la integración de energía por varias plantas o los procesos usando la transferencia de calor indirecto o directo.

Descripción del STE del ingenio

En el trabajo se evaluó energéticamente un central de azúcar crudo, con una molida potencial de 115.75 kg/s. Tiene una refinería adjunta que requiere 5.56 kg/s de vapor para su producción.

Generación de vapor y electricidad

Posee tres turbogeneradores de 4 MW, que operan a la presión y temperatura del vapor sobrecalentado (directo) de 2861 kPa y 663 K que sale de los generadores de vapor. Se tiene cuatro generadores de vapor dos de 16,67 kg/s y otro par de 12, kg/s. El vapor directo pasa por una válvula reductora (VR) para uso del secador de la refinería y la limpieza de tachos y de molinos. Si el vapor de escape de los turbos no es suficiente para la zona de producción también se hace circular vapor por otra válvula reductora de alta (VRA). La presión de escape de los turbos es 260 kPa. La fábrica demanda 9600 kW de potencia.

La figura 1 muestra el diagrama de flujo de información obtenido del STA para el central.

Destilería

Con el fin de dar paso a las tendencias actuales; se hace necesario la vinculación íntegra de una destilería con una capacidad de producción de 450 hl/d. La materia prima que se utilizaría en la fábrica es miel B, pero la destilería también podría trabajar con miel final del proceso de producción de azúcar crudo, que se almacena en las cisternas.

La figura 2 muestra el diagrama de flujo de infor-

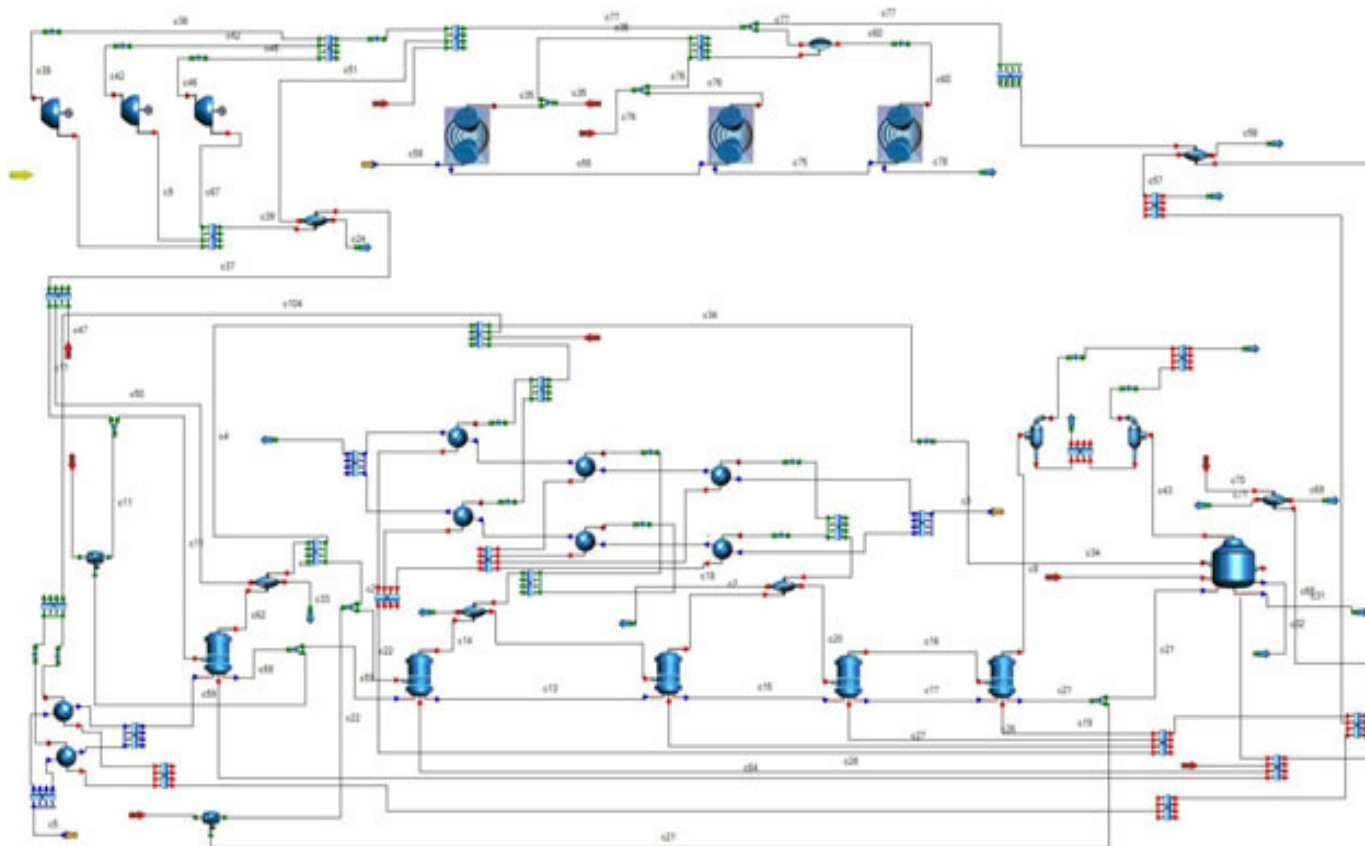


Figura 1. Diagrama de flujo de información del central.

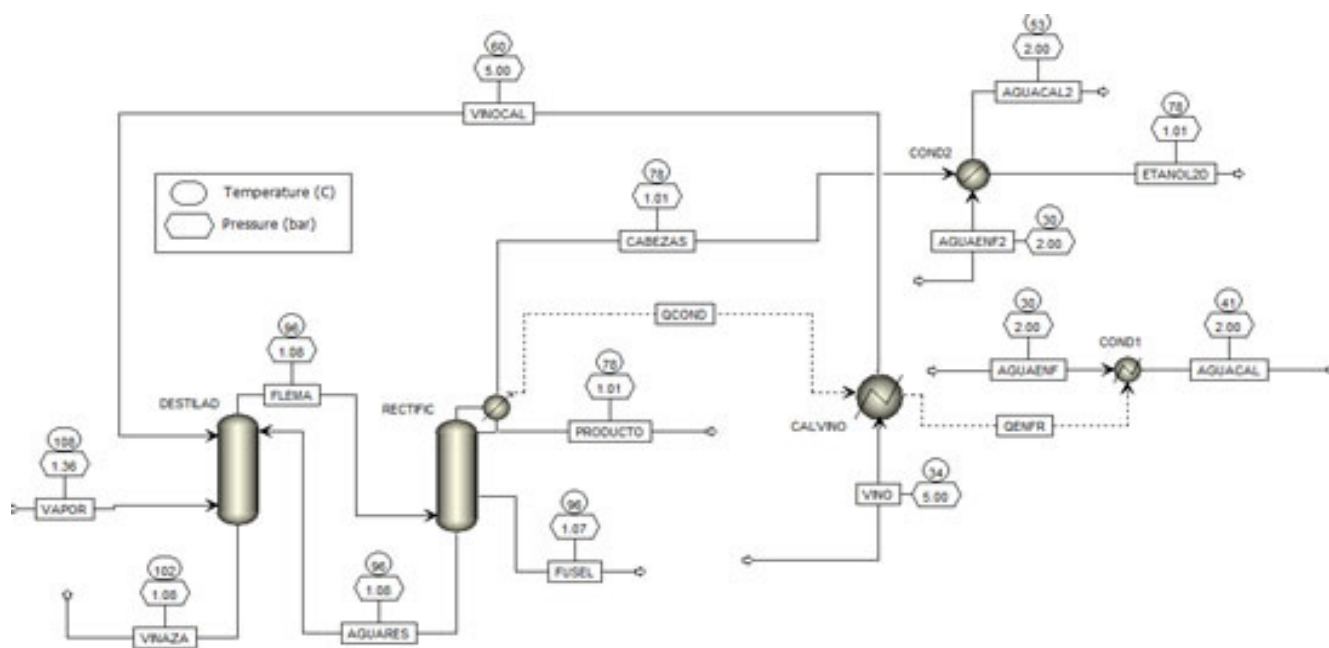


Figura 2. Diagrama de flujo de información de la destilería.

mación de la destilería en cuestión.

Datos para el estudio de integración

En las tablas 1, 2 y 3 se representan las corrientes de interés para la realización del estudio de inte-

gración energética.

Para el cálculo del ΔH (flujo calórico o potencia) se utilizaron las ecuaciones:

$$\Delta H = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

Ec. 1

$$\Delta H = m \cdot (h_2 - h_1)$$

Ec. 2

Tabla 1. Bioeléctrica

Nombre de las corrientes	Presión (kPa)	Temperatura (K)
Vapor de alta presión	2861	663
Vapor de escape	260	483

Tabla 2. Producción de azúcar crudo

Operación	Temperatura inicial (K)	Temperatura final (K)	ΔH (kW)
Jugo mezclado	317.15	378.15	25776.6
Jugo claro	370.15	394.15	10885.4
Evaporación en V1	392.04	392.09	62505.4
Condesado en V1	386.57	386,57	43834.3
Condesado en V2	378.49	378.48	45667.4
Condesado en V3	378.26	377.82	33963.6
Condesado en V4	363.29	363.29	38916.5
Condesado en V5	362.919	362.02	22072.8

Tabla 3. Destilería

Operación	Temperatura inicial (K)	Temperatura final (K)	ΔH (kW)
Vino	351.15	350.15	1111.04
Vapor tope columna 2	351.15	350.15	0.529
Vinaza columna 1	373.15	308.15	216.53
Agua de reposición	352.15	305.15	12.869
Alcohol rectificado	352.15	305.15	121.824
Vapor de cabeza	359.15	368.15	1.37
Cola	307.15	339.15	8.373

Donde:

m: es flujo másico de la corriente [kg/s],

Cp: capacidad clórica específica [kJ/kg °C],

h: entalpía específica [kJ/kg]

Los valores de entalpía específica se obtuvieron a través de tablas de las propiedades del agua y las capacidades caloríficas (del material azucarado) se calcularon mediante la ecuación 3.

$$Cp = 4,19 - 0,0234 \cdot Brix$$

Ec. 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso base

Análisis de los indicadores

Para tener un bosquejo del funcionamiento del ingenio caso base se le realizó un estudio de diferentes indicadores operacionales. Los indicadores

se dividen en grupos; los globales, por área y por equipos. En la tabla 4 que se muestra presenta una parte de los indicadores globales.

Según la literatura especializada en la fábrica debe de haber entre un 5 % y un 10 % de bagazo sobrante para los arranques, parada o liquidaciones (15). En este caso se ve que se tiene más del valor necesario para las funciones anteriormente mencionadas lo cual implica que no se corre ningún riesgo de tener que utilizar combustible alternativo para el funcionamiento de los generadores de vapor. Este sobrante está condicionado por el consumo de vapor de la fábrica y el valor calórico inferior del bagazo (asociado a su humedad). Por tanto, si se logra reducir el consumo de vapor y la humedad del bagazo se pudiera alcanzar un mayor excedente de este último además que se ganaría en eficiencia energética. Según Rein (15), el consumo de vapor en los centrales más eficientes es inferior al 40 % del peso en caña.

En cuanto al vapor expulsado a la atmósfera se obtiene cero como se presenta en la tabla 4, lo

que representa que no hay un gasto tanto de masa (agua con la calidad para usar en el proceso) como de energía. En el ingenio existen dos lugares donde puede ocurrir este fenómeno: en la VRA y VRP. Debido a que el vapor expulsado es cero, en la reductora de alta no habrá que disminuir la carga de los turbos y no se verá afectada la producción de electricidad que en este caso se encuentra al máximo. Con el mismo valor en la reductora de proceso se induce que hay una buena sincronización en la zona de evaporación.

Otro indicador a revisar es el flujo de vapor por la VRA y la VRP. Para compensar las fluctuaciones normales del consumo de la estación de tachos es necesario y conveniente pasar vapor por la válvula reductora de alta presión, pues es más ventajoso económicamente que compensar estas fluctuaciones con los turbogeneradores. Los valores típicos de este indicador se encuentran entre 5 y 25 % de peso en caña. En cuanto al flujo que se hace pasar por la de proceso depende del déficit de evaporación del pre-evaporador (V1), ya que no siempre es conveniente aumentar la magnitud de la extracción. Para la reductora de proceso, una de las soluciones sería tomar las extracciones del primer vaso y colocarlas en otro vaso de ser posible, el valor que presenta es alto.

En la tabla 5 se muestran los indicadores por área. Los valores están sujetos a la estructuración del área de evaporación, esquema con el cual se efectúa la cocción de las masas y la eficiencia de trabajo del área de evaporación que es de 50.33 % para el caso base (CB). Esto se debe a que hay pér-

didas considerables al condensador barométrico, lo cual es un efecto indeseable en cualquier sistema de evaporación. Para lograr un mejor comportamiento se hace necesario disminuir la evaporación (la distribución apropiada del brix en los efectos) del último efecto o emplear la misma en un equipo de calentamiento. En este efecto la evaporación tiene un elevado calor latente, volumen específico y baja temperatura debido a las bajas presiones, la cual limita su uso para el intercambio de calor.

Para el estudio del comportamiento de los equipos se realizó el cálculo de sus indicadores. Los valores obtenidos indican que el grupo de calentadores del jugo mezclado posee baja efectividad termodinámica lo cual está ocasionado por la diferencia terminal de temperatura. La efectividad es la relación entre la máxima cantidad de calor que se puede transferir y la cantidad de calor que se transfiere del vapor de calentamiento al jugo, como se ilustra en la ecuación 4.

$$Efectividad\ temica = \frac{\Delta T\ jugo}{T_{vapor} - T_{entrad\ del\ jugo}}$$

Ec. 4

En el sistema de calentadores de jugo mezclado el ΔT del jugo siempre es el mismo y la temperatura del vapor de calentamiento está en función del efecto en que se realice la extracción. En el calentador primario el vapor de que se utiliza es del 3er. efecto con una temperatura relativamente alta para ser empleada en este calentador. Existen variantes con las que se puede aumentar la efectividad termodinámica.

Tabla 4. Indicadores globales

Indicadores	Valor
Bagazo sobrante (% disponible)	21.48
Consumo vapor de la fábrica (% peso en caña)	46.60
Vapor directo a escape reductora de alta (% flujo másico caña)	11.45
Vapor escape reductora proceso (% flujo másico caña)	9.12
Vapor total expulsado a la atmósfera (% peso en caña)	0
Producción eléctrica específica de la fábrica (kW-h/t caña)	28.79
Demanda eléctrica específica de la fábrica (kW-h/t caña)	23.033

Tabla 5 Indicadores por área

Indicadores	Valor
Consumo de vapor en tachos (% peso en caña)	14.13
Pérdidas de calor evaporación al condensador barométrico del múltiple (% demanda del múltiple efecto)	25.03
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de casa de calderas (%)	49.67

ca, gracias a que las otras variables que intervienen se pueden fijar en la simulación.

Del comportamiento de los evaporadores los coeficientes globales de transferencia de calor se encuentran con valores descendentes a medida que se avanza en el múltiple efecto, pero en el 5to vaso el valor no es el típico de este. La tasa de evaporación es elevada en el 3er., 4to. y 5to. vaso. Solo se justifica la elevada tasa de evaporación del 3er vaso debido a que se realizan extracciones en este. En cuanto al 4to. y 5to. vaso se infiere que tienen un área pequeña para la molida o demasiada evaporación para la superficie de intercambio de calor que posee.

Integración energética en el ingenio

En el estudio del ingenio para ΔT de 10 °C como mínimo valor de separación en las curvas para industrias químicas (16), el punto pinch se encuentra a una temperatura de 49 °C. El potencial energético mínimo de calentamiento necesario para este proceso es de 94588 kW.

El análisis pinch se realiza para ver de forma eficiente los verdaderos requerimientos de energía del caso base. En las curvas que se obtuvieron no se observa verticalidad en ella por lo que no hay un aprovechamiento óptimo del potencial calórico en las corrientes que intervienen en el proceso.

El consumo total de servicio auxiliar de calentamiento del proceso de producción de azúcar crudo es de 44,12 kg/s; a través del análisis realizado se puede ver que con la correcta utilización de las co-

rrientes del sistema se logra disminuir ese consumo en un 20.52 %. En el central se está sobreutilizando el vapor de escape, lo cual se puede corregir con la aceptada distribución de las líneas de vapor en el proceso crudo.

Integración de la destilería

El examen realizado al proceso de producción de alcohol de manera energética, brinda un flujo calórico mínimo necesario para el funcionamiento de la destilería de 781 kW.

Al igual que en el caso del central el ΔT es 10 °C, las curvas no tienen verticalidad en ella por lo que tampoco aquí hay un aprovechamiento óptimo en las corrientes que intervienen en el proceso.

Análisis del sito total

Para comprender las necesidades del complejo como un todo y poder realizar las reestructuraciones necesarias, para un uso más eficiente del vapor que se dispone, es imprescindible un análisis de energéticos de las corrientes del sistema. Para ello en la figura 3 y 4 se muestran los resultados que se obtuvieron del estudio.

A partir de la figura 3 se determina que el flujo calórico que se necesita para satisfacer la demanda del sitio total es de 95084 kW. Aquí se ve que la mayor demanda que se tiene es de la evaporación del primer vaso. También la figura muestra la cantidad de calor que se puede recuperar entre los dos procesos.

En la figura 4 aparece la distribución del vapor a

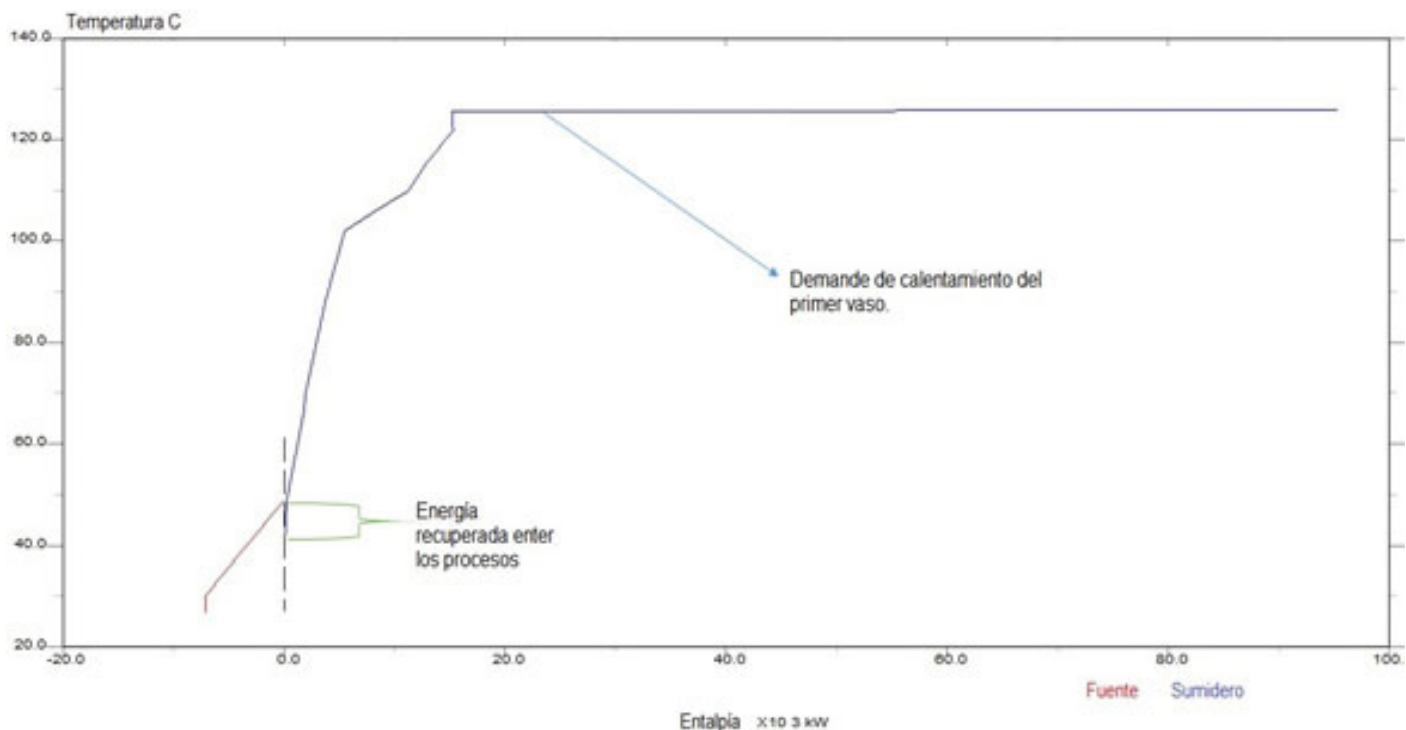


Figura 3. Perfiles de fuente y de sumidero de energía del complejo.

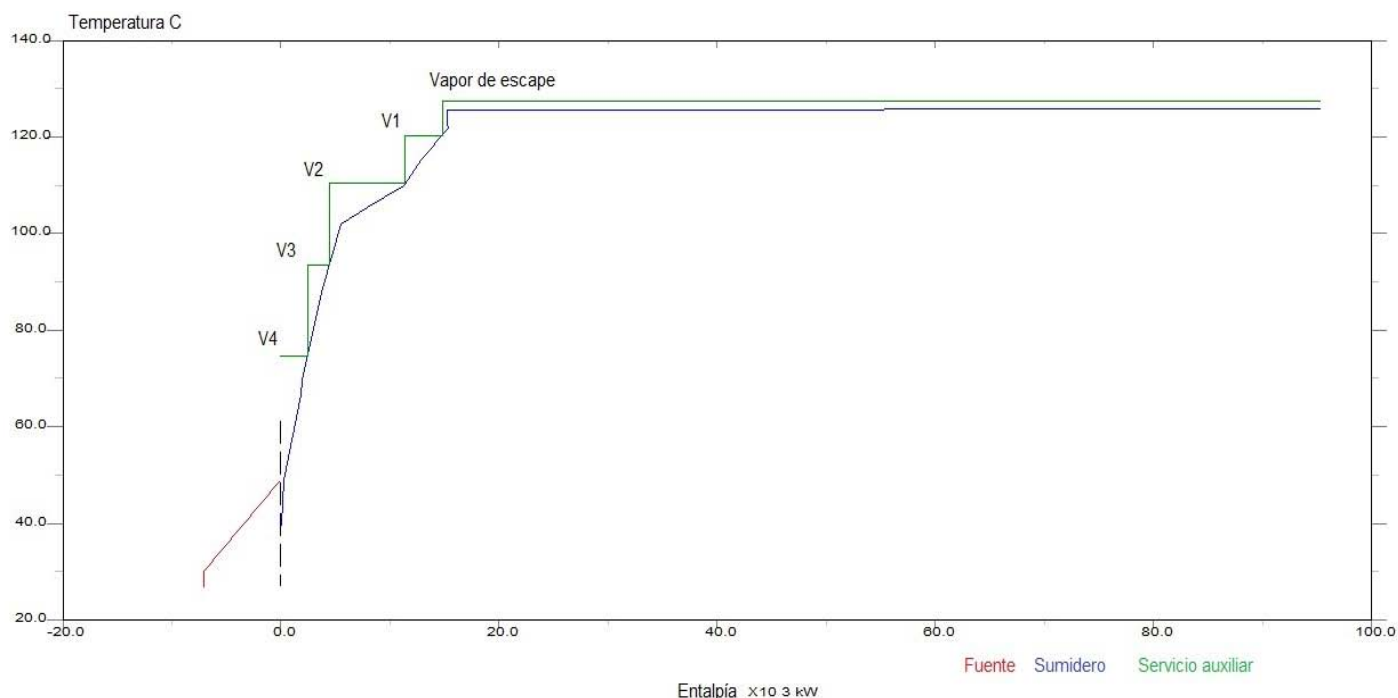


Figura 4. Composición de vapor del complejo basado en los perfiles de la fuente y el sumidero de energía.

distintos niveles según la necesidad. La distribución se hace con la evaporación del primer efecto hasta el cuarto efecto y el vapor de escape. Si no se tiene en cuenta la demanda de vapor de la estación tacho el mayor flujo calórico que demanda el proceso es el del segundo efecto.

Alternativas de mejoras

En las tablas 6 y 7 se recogen los resultados de los indicadores antes evaluados para el caso base.

En la tabla 6 para CM 1 se evidencia que con la

implementación de la maza Lotus se logra un mayor excedente de bagazo, esto es posible debido a que con la disminución de la humedad aumenta el valor calórico del bagazo se necesita menos cantidad para producir el mismo flujo de vapor. En el mismo caso con el aumento a 65 el brix de la meladura se logra una disminución del consumo de vapor en los tachos y una eficiencia de la zona de evaporación de 49.24 %.

En el CM 1 como no se realiza ningún cambio en

Tabla 6. Comparación casos mejorados(CM). Indicadores globales

Indicadores	CM 1	CM 2	CM 3
Bagazo sobrante (% disponible)	27.11	36.05	15.72
Consumo vapor de la fábrica (% peso en caña)	45.60	40.01	50.16
Vapor total expulsado a la atmósfera (% peso en caña)	0	0	0
Producción eléctrica específica de la fábrica (kW-h/t caña)	28.79	28.79	71.97
Demanda eléctrica específica de la fábrica (kW-h/t caña)	23.03	23.03	23.03

Tabla 7. Comparación casos mejorados(CM). Indicadores por área

Indicadores	CM 1	CM 2	CM 3
Consumo de vapor en tachos (% peso en caña)	12.58	12.09	12.09
Pérdidas de calor evaporación al condensador barométrico del múltiple (% demanda del múltiple efecto)	25.82	14.71	14.71
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de casa de calderas (%)	50.78	42.16	42.16

el esquema de calentamiento y en el de evaporación el funcionamiento del equipo permanece igual que el CB.

Para el CM 2 manteniendo las mejoras realizadas en el CM 1 y con la adición de la integración del complejo se logran resultados favorables. Aquí se obtiene un aumento considerable del excedente de bagazo, que está ligado al mejor aprovechamiento del vapor que se genera. En este caso mejorado se consume menos vapor. El CM 2 brinda una eficiencia en la zona de evaporación de 51.4 %. Con la realización de la integración energética se logra reducir el consumo de vapor en el proceso de crudo en 10.26 % lo que demuestra que es posible lograr cambios favorables con el uso eficiente del vapor sin la necesidad de acudir a nuevas tecnologías. También el estudio dicta que es posible la alimentación a la destilería con la evaporación del 2do. vaso.

La diferencia más notable del comportamiento de los vasos evaporadores es en la tasa de evaporación del último efecto. En el CM 2 se realizan extracciones desde el primer hasta el cuarto efecto para las necesidades del sistema, por lo que se entiende la elevada tasa de evaporación relativa de los vasos. En la tabla 8 se muestra una comparación de la economía y la tasa de evaporación por vaso en los casos mejorados 1 y 2.

En ambos casos la economía de los vasos es ascendente, que es una de las maneras de corroborar el buen funcionamiento del múltiple efecto.

La única diferencia entre el caso base y el CM 1 es el bagazo sobrante y aumento de la eficiencia en la zona de evaporación. El CM 2 ofrece, además de lo anteriormente visto, la disminución del flujo de vapor por ambas válvulas reductoras disminuyendo así las pérdidas exergéticas. Para este caso se tiene 4.26 % y 5.21 % en peso de caña para la válvula de alta y de proceso; indicando que se está haciendo un manejo eficiente de la energía que contiene el vapor utilizado en los equipos del proceso.

Para un logro global de la eficiencia energética de los complejos industriales correspondientes a la caña de azúcar, se hace necesario el conocimiento preciso de los requerimientos de cada área. Se

necesita conocer la demanda de utilidades no de la planta en general (refinería, destilería); sino la segmentación de estas demandas por etapas de cada proceso productivo para lograr una acertada distribución de los vapores a nuestra disposición.

Los coeficientes globales de transferencia de calor obtenidos en los calentadores, en el CM 2, mejoraron respecto a los que se tenían en CB. Esto fue posible ya que se aprovechó la extracción del 4to. vaso para el calentador primario, la extracción del 3er. vaso para el secundario y la extracción del 2do .vaso para el rectificador. Los cambios se efectúan con el objetivo de mejorar la transferencia de calor y disminuir el consumo de vapor de la fábrica.

A pesar de lograr mejoras considerables en el funcionamiento del complejo que se plasma en los diferentes indicadores, hay cambios que todavía se pueden realizar. Por ello en el CM 3 trae a colación el incremento de la capacidad del sistema de producción eléctrica a 30 MW manteniendo los cambios realizados en los casos anteriores.

Una de las opciones tecnológicas más conocidas para mejorar el índice de generación de electricidad es la introducción de una turbina de extracción condensación para la generación dentro y fuera de zafra. Por lo que en el CM 3 se instala un turbogenerador de contrapresión (TGCP) de 5 MW y un turbogenerador de extracción condensación (TGEC) de 25 MW, con lo que se logra vender 48.94 kW-h/t caña. Esta alternativa tiene un impacto directo en los ingresos por concepto de venta de electricidad al SEN e indirectamente el país logra ahorrar dinero por concepto de consumo de combustible fósil.

El empleo del TGCP facilita la estabilidad del TGEC ya que posibilita trabajar a la máxima capacidad de potencia instalada. Permite que este último sea operado en las condiciones que recomienda el fabricante y con la cuantía de extracción adecuada. Este es un equipo muy costoso e importante para lograr una generación significativa de electricidad.

Para la TGEC el salto entálpico depende de la presión de entrada del vapor sobrecalentado y de la presión en el vapor de escape que entra al condensador, en la medida que esta diferencia aumenta

Tabla 8. Comparación CM 1 y CM 2 vasos evaporadores

Vasos	Economía (adimensional)		Tasas de evaporación(kg/h-m²)	
	CM 1	CM 2	CM 1	CM 2
1	0.90	0.91	34.31	34.31
2	1.00	1.00	32.74	39.41
3	1.05	1.05	53.53	51.88
4	1.07	1.05	45.63	39.42
5	1.09	1.16	49.96	28.46

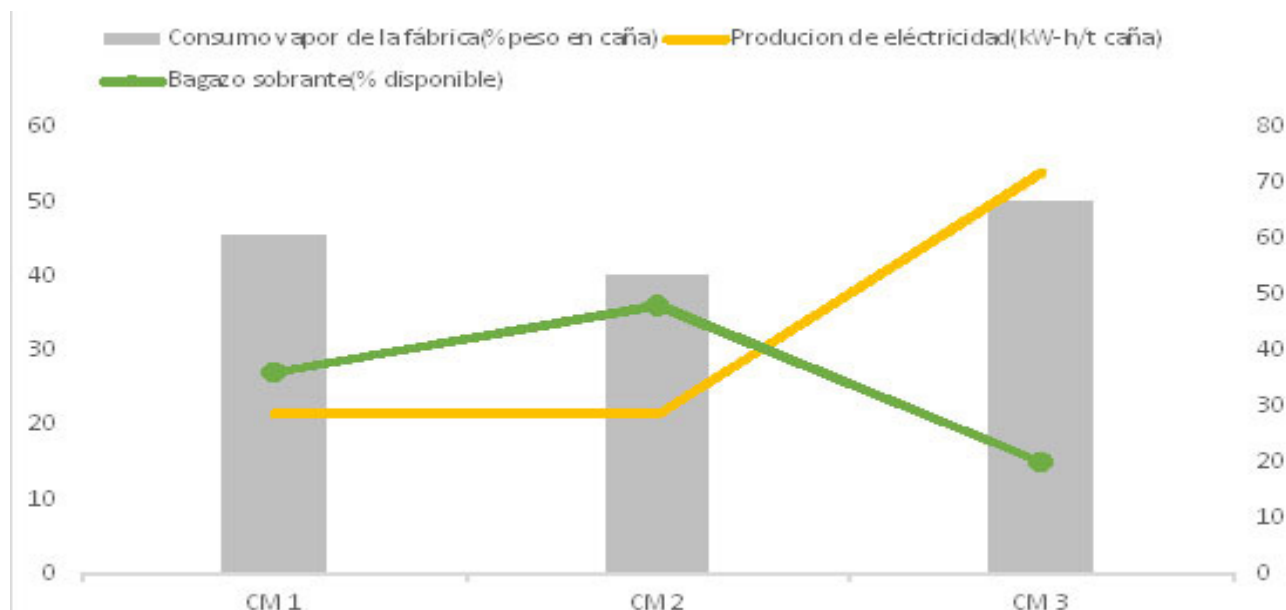


Figura 5. Comportamiento del bagazo sobrante, consumo de vapor de la fábrica y producción eléctrica en las diferentes alternativas.

mayor será la disponibilidad de hacer trabajo. Este tipo de turbinas resulta muy útil si el objetivo es generar grandes cantidades de electricidad para las ventas al SEN durante todo el año. Aunque presentan el inconveniente de que el costo es mayor que el de una turbina de contrapresión de similar potencia. Esto puede ser compensado a largo plazo cuando la bioeléctrica comience a recibir ganancias por concepto de generar electricidad sin el empleo de combustibles fósiles.

A pesar que se redujo el consumo de vapor de la fábrica a través del eficiente uso del vapor en el proceso del crudo, en CM 3 aumenta el consumo de la fábrica debido a un aumento a de la capacidad eléctrica instalada. En la figura 5 se establece una perspectiva entre los tres casos en cuanto al bagazo sobrante, la producción eléctrica y el consumo de vapor de la fábrica.

En la gráfica se esclarece las diferencias entre los tres CM con los parámetros antes mencionados. A pesar de tener un mayor consumo de vapor y un menor bagazo sobrante, se produce mayor electricidad en el CM 3; este también permite producir electricidad en el tiempo de no zafra. Debido a que la mayor prioridad es la ayuda a la economía y sostenibilidad del sistema del país se escoge el CM 3.

El tiempo de operación de no zafra para la bioeléctrica es de 59 días dando un total de días

de trabajo al año de 239. Desde el punto de vista de la política de desarrollo del país esto es un gran avance.

CONCLUSIONES

1. Se logró simular el caso base de los procesos involucrados en el estudio de la integración.
2. Se determinó los requerimientos energéticos mínimos de cada proceso con 94 588 kW para el ingenio y 781 kW para la destilería. Para el complejo industrial se obtuvo 95 084 kW.
3. A partir del análisis del sitio total se obtuvieron alternativas para el complejo industrial bioeléctrica-central-destilería con las que se logra aumentar el sobrante de bagazo, la disminución del consumo de vapor de la fábrica y aumentar la generación de electricidad para vender un total de 20 400 kW-h.
4. En el CM 3 aumenta el consumo de vapor de la fábrica y disminuye el bagazo sobrante pero se gana en venta de electricidad al SEN, además de poder seguir generando electricidad en período de no zafra de 59 días, resultando un VAN de 38 291 075 CUP con una TIR de 32,9 % para el proyecto de inversión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Recursos energéticos globales. 2013: World Energy Council.
 2. Jeffries, B. El informe de la energía renovable, S. Singer and J.P. Denruyter, Editors. 2011, WWF, ECO-FYS, OMA.
 3. Boldyryev, S., Krajačić, G. and Duić, N. Cost Effective Heat Exchangers Network of Total Site Heat Integration. Chemical Engineering Transactions, 2016: p. 541-546.
 4. Fabelo, F.J.A., González, S.E. and González, C.M. Análisis del manejo eficiente del agua y la energía en una destilería de etanol. . Centro Azúcar, 2013. 40.
 5. Cortés, M.G., *et al.* Impacto de la integración de los procesos de azúcar y derivados. Tecnología Química, 2013. 33: p. 20-26.
 6. Ramos, M., Cortés, M.G. and Pedraja, R.E. Integración de procesos y análisis de cogeneración en las producciones de azúcar y alcohol. Centro Azúcar, 2014. 41(4): p. 50-58.
 7. Consolidación semanal eficiencia energética con macro zafra 2016-2017. 2017, ICIDCA.
 8. Cortés, M.G., *et al.* Análisis de factibilidad de la integración de los procesos de producción de azúcar y alcohol. AFINIDAD, 2013. 70: p. 284-288.
 9. Perez, G.A. Implementación de algoritmos de Análisis Pinch para la integración energética en industrias de procesos 2008, CUJAE.
 10. Pina, E.A., *et al.* Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane—Evaluation of different plant configurations. Energy, 2015.
 11. Salabarría, L.G. Diseño conceptual y operación del conjunto Bioeléctrica – Ingenio: Análisis de casos, in Facultad de Ingeniería química. 2014, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
 12. Premisas compendio de cálculos energético 25 bioeléctricas. 2017, ECIAZ.SA.
 13. González, A.M.R., Rodríguez, M.A.R. and Díaz, P.R.R. Estudio económico y consideraciones técnicas sobre la conveniencia del empleo de presión de vapor de 65 ó 100 bar para la construcción de bioeléctricas en Cuba.
 14. Borges, R.J., Yanes, J.P.M. and Llanes, J.L. Oportunidades de incremento de energía eléctrica en los centrales azucareros de la provincia de Cienfuegos.
 15. Rein, P. Cane sugar engineering. 2016: Verlag Dr. Albert Bartens KG.
 16. Duque, M.G. Tecnología Pinch. 2003, Instituto superior politécnico José Antonio Echeverría.
-