

Análisis de cogeneración para satisfacer las demandas de las producciones integradas de azúcar y alcohol

Cogeneration analysis in order to satisfy integrated productions of sugar and alcohol

**Dra. Meilyn González-Cortés^I, mgonzalez@ucly.edu.cu, Ing. Luis Dayro Soto del Valle^{II},
Ing. Yenisleydis Martínez-Martínez^I, Dra. Marlen Morales-Zamora^I,
PT. Rubén Espinosa-Pedraja^I**

^IUniversidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Departamento de Ingeniería Química; ^{II}Empresa Azucarera Heriberto Duquesne. Remedios. Villa Clara. Santa Clara. Clara. Cuba.

Resumen

Se evaluó la posibilidad de integración de los procesos de fabricación de azúcar y alcohol a través del intercambio de corrientes materiales como miel, jugo diluido, bagazo del proceso de fabricación de azúcar para su empleo en la obtención de etanol, así como la integración energética con el uso del método pinch. Se estimó el consumo de vapor en los turbogeneradores, así como parámetros de rendimiento, eficiencia exergetica entre otros, encontrándose por debajo de las normas técnicas. Por ello se propuso un cambio en el sistema de cogeneración obteniéndose valores superiores en los rendimientos y eficiencias al compararlos con la tecnología instalada. Del balance económico realizado se obtuvieron valores que respaldan la posibilidad del cambio de tecnología, lo que beneficiaría a los procesos de azúcar y alcohol en el mejoramiento de sus producciones, dada la posibilidad de tener una mayor disponibilidad de materia prima para ambos procesos.

Palabras clave: producciones integradas, cogeneración, azúcar, alcohol, análisis pinch.

Abstract

The possibility of process integration in the production of sugar and alcohol was evaluated through the exchange of raw matter such molasses, diluted juice, and bagasse from the sugar process for their use in the ethanol production. The energy integration was also carried out in these processes with the use of the pinch method, for that the cold and heat streams were analyzed with possibilities for it. The steam consumption was estimated in turbogenerators, exergetic efficiency and other were calculated too for a better knowledge of the operational state of the same ones, being these below the technical norms, for what intended a change in the cogeneration system for a better use of the system obtaining higher values for the efficiencies when comparing them with the installed technology. The economic balances were carried out in the cogeneration scheme and as result were obtained that support the possibility of the technology change, what would benefit to the processes of sugar and alcohol in the improvement of their productions, given the possibility to have a bigger availability for raw matter for both processes.

Keywords: integrated productions, cogeneration, sugar, alcohol, pinch method.

Introducción

En las producciones de azúcar y alcohol se tienen bien caracterizados los consumos de energía térmica y un estudio de este aspecto en ambos procesos, sin dudas conducirá a la identificación de oportunidades para un manejo más eficiente de la energía.

En la literatura científica se pueden encontrar varios trabajos referidos a la temática del uso eficiente de la energía térmica en los procesos, muchos de ellos se basan en la aplicación de herramientas de integración energética que permiten a partir de un análisis de los procesos, identificar las oportunidades que existe en los mismos para aprovechar la energía térmica de corrientes del mismo proceso para suplir requerimientos de utilidad y que en los procesos actuales, previo a los estudios de integración no se aprovechan. Lo que se ha explicado significa en un análisis de integración energética entre corrientes calientes y frías en los procesos, lo cual es implementado a través de una red de intercambio de calor.

Por otro lado, los procesos y en particular los que se estudian en este artículo, no sólo tienen oportunidades para su integración energética, sino que también ofrecen oportunidades para su integración material a través del intercambio de recursos materiales, como pueden ser agua, materias primas, productos que se generan en una y pueden constituir productos de entrada en otros, etc.

A medida que se han ido estudiando las posibilidades antes planteadas se han sumado barreras para la integración, entre estas se encuentran la fiabilidad de los equipos para esta integración, necesidad de un balance en los procesos involucrados para garantizar de forma ininterrumpida que las materias primas de cada uno individualmente, no afecten al resto de los procesos provocando paradas, la disponibilidad de energía o recursos materiales para satisfacer los requerimientos de los procesos, y en el caso que un materia prima pueda tener varios usos, que cantidad se debe destinar a cada uno, entre otros aspectos.

Para esclarecer este último aspecto, se tiene el caso del bagazo, que es generado en el proceso azucarero y que históricamente ha sido destinado a la producción de energía térmica y eléctrica pero que en un contexto donde las producciones de azúcar y alcohol se integren puede ser empleado también para la producción de alcohol. En este punto se tiene entonces la alternativa de

lograr mayores excedentes de bagazo para satisfacer la demanda térmica y eléctrica de los procesos y producir más electricidad para la venta, así como para su empleo como materia prima para producir alcohol.

Unido a ello para que las fábricas de azúcar dejen un mayor excedente de bagazo, los esquemas de cogeneración tendrían que ser altamente eficientes. Es por lo anterior que en este artículo se pretenden evaluar alternativas de integración de los procesos de azúcar y alcohol, sujeto a un sistema de cogeneración de mayor eficiencia que resulte en un complejo productivo sostenible desde el punto de vista técnico y económico.

Materiales y métodos

En años anteriores se ha estudiado la posibilidad de realizar una integración de procesos eficientes, económicos y rentables, con el objetivo principal de reducir el consumo de utilidades en los procesos a través del aprovechamiento de los recursos materiales y energéticos de los propios procesos, [1-3].

Como se ha explicado, la integración de procesos se basa en que de la obtención de productos principales se generan corrientes residuales que se pueden utilizar en el propio proceso o en otros procesos haciendo de dos o varios procesos que una vez fueron independientes un complejo industrial [4-6]. También la integración de procesos se basa en que todos los procesos consumen energía térmica para sus producciones, la cual en ocasiones se pierde en corrientes residuales y que puede ser recuperada y aprovechada por el propio proceso o por otros disminuyendo de esta manera el consumo de una utilidad, ya sea caliente o fría, [7-9].

En el caso que se aborda en este trabajo que es la integración de los procesos de azúcar y alcohol; a las posibilidades de intercambio material entre estos procesos, que se tienen fundamentalmente a través de que el proceso azucarero puede aportar jugo y miel como sustrato azucarado para la fermentación alcohólica y el proceso azucarero tiene implícito un sistema de cogeneración para producir las energías térmicas y eléctricas demandadas por su proceso; se une una nueva realidad, que prevé vender excedentes de electricidad por las fábricas así como el empleo del bagazo como materia prima para otros procesos, [10]; por lo que se requiere buscar un compromiso entre estos factores (bagazo para obtención de otros productos, (etanol, furfural, lignina) o bagazo para producción de electricidad).

A su vez, la posibilidad de vender la electricidad excedente a la red o emplear el bagazo sobrante como materia prima para otros procesos ha motivado inversiones en sistemas de cogeneración, [12,13] y sistemas de integración térmica más eficientes, con el objetivo de lograr mayores excedentes de bagazo.

Caso de estudio

Para el estudio que se presenta se toma una fábrica de azúcar y una destilería que produce alcohol extrafino, 96,3 °GL. La fábrica de azúcar realiza su producción con el jugo extraído del primer molino y destina a la producción de alcohol el jugo de los restantes molinos y el jugo de los filtros, denominando a este sustrato, jugo diluido, también así como las mieles generadas. Además, produce el vapor requerido por la destilería. La fábrica de azúcar tienen dos calderas que generan 25 t/h de vapor a una presión de 250 lbf/ pulg² y temperatura de 320 °C.

Los consumidores primarios son dos turbogeneradores de 1,5 MW; a 250 lbf/ plg² y 320 °C y una turbina Skoda de 150 lbf/ pulg².

El esquema de uso de vapor para el proceso es el siguiente: existen dos válvulas reductoras, una de 250 a 150 lbf/pulg² y otra de 250 a 20 lbf/pulg². El vapor destinado a la limpieza es de la línea de 150 lbf/pulg². La alimentación de los pre evaporadores se realiza de la línea de 20 lbf/pulg² y de la misma se alimenta el calentador de jugo clarificado. El vapor generado en los pre-evaporadores se suministra a los vasos y a los calentadores rectificadores, del primer vaso se extrae vapor que es alimentado a los calentadores primarios. En la línea de 20 lbf/pulg² hay instalada una reductora de 20 a 10 lbf/pulg², de la misma se suministra vapor a los tachos y a los calentadores del jugo destinado a la destilería de alcohol.

Los cálculos realizados en el proceso de producción de alcohol se realizaron en los principales equipos consumidores de vapor, en este caso las columnas destiladora, lavadora, purificadora y recuperadora.

Para el estudio de integración energética, como primer paso se realizan los balances de masa y energía en cada uno de los procesos, identificando en cada etapa los consumos y características del vapor, ya sea el que se genera en el área de generación de vapor o el consumido por los equipos tecnológicos,

de forma similar se realiza en la etapa de destilación alcohólica, de modo que de este análisis se tiene el requerimiento de utilidades que tiene este proceso.

En este punto también son calculados los flujos de jugos tanto para la fabricación de azúcar como de alcohol.

Integración energética en la fabricación de azúcar y alcohol

Para la integración energética se identifican las corrientes frías y calientes involucradas en ambos procesos, con el objetivo de determinar el consumo mínimo de utilidades en primer lugar para cada uno de los procesos de forma individual y luego para el proceso integrado.

Para realizar la integración energética se emplea el ASPEN Pinch, los datos de las corrientes en estudio que se toman en cuenta son los siguientes:

- Flujos máxicos de cada corriente.
- Comportamiento de la misma (si actúa como fría o caliente).
- Capacidades caloríficas.
- Entalpías.
- Temperatura de entrada y salida en cada una de las fases.
- Diferencia de temperatura.

Con los datos introducidos se obtienen las curvas compuestas donde se puede observar el Punto de Pellizco (Pinch) y la curva de composición grande. El punto Pinch en estas curvas es el menor valor de las temperaturas de las corrientes calientes por sobre el cual ningún enfriamiento utilitario puede llevarse a cabo y es el mayor valor de temperatura de las corrientes frías por debajo del cual ningún calentamiento utilitario puede llevarse a cabo.

Se realiza un análisis en el sistema de cogeneración actual, analizando la posibilidad de entrega de vapor a la destilería.

El consumo total de vapor representa el 45,74 % de vapor en caña que se corresponde con el tipo de esquema térmico utilizado, no obstante el mismo se ve en gran medida influenciado por la demanda de vapor a la Destilería, la cual debe balancearse de forma tal que esta sea la mínima posible para que el consumo de vapor del proceso disminuya, de igual forma también influye el flujo de jugo que se destina a la misma, lo cual determinará un menor consumo de vapor en la fábrica de azúcar.

Si se considera que las pérdidas por fugas, purgas, mal aislamiento térmico más el vapor necesario para dar escoba representa un 5%, la cantidad de vapor a generar en las Calderas será de 53,79 t/h, este valor supera la capacidad instalada de generación de vapor (50 t/h).

Análisis de esquemas de cogeneración

Se calcularán dos variantes de esquemas de cogeneración, la primera incluye un generador que produce 70 t/h de vapor con una presión de 2,8 MPa (410 lbf/pulg²) para el proceso productivo y la destilería, así como un turbogenerador que trabaja a esta presión al cual se le calculará la potencia eléctrica que puede entregar en estas condiciones de presión y temperatura, y una segunda variante donde se utiliza un turbogenerador de extracción condensación, trabajando a 4 MPa (580 lbf/pulg²) de presión y un generador de 80 t/h de vapor, lo cual reducirá el consumo de la reductora posibilitándose la cogeneración con todo el vapor utilizado por el proceso.

Resultados y discusión

Cuando hay desvío de jugo a la destilería, el cálculo se realiza tomando como base que un 78% de la molida se destina a la producción de azúcar, es decir, 69,87 t/h y relación de imbibición de 30%. El por ciento se determinó a partir del análisis que se hizo en 90 días de zafra de la cantidad de jugo que fue destinado a la producción de alcohol. En la tabla 1, se muestran los resultados para los consumos de vapor.

Tabla 1
Consumos de vapor y su tipo en el proceso para los dos escenarios evaluados

Equipo	Tipo de vapor	Con desvío, kg/h	Sin desvío, kg/h
Calentador rectificador	Escape	1 763,43	1 961,24
Calentador 1 y 2	escape o vegetal	2 558,46	2 880,7
Calentador 3	escape o vegetal	1 279,23	1 540,35
Calentador 4	escape o vegetal	2 814,31	3 008,77
Calentador 1y 2 destilería	escape	1 918,85	-
Pre-evaporador 1	Escape	22 530,21	23 502,61
Pre-evaporador 2	Escape	20 903,30	22 973,08
Vaso 1	Vegetal	16 745,75	21 472,91
Vaso 2	Vegetal	6 461,86	8 285,98
Vaso 3	Vegetal	5 261,06	6 746,20
Tachos	Vegetal	13 276,3	17 024
Destilería	Vegetal	5 793,24 (vapor disponible a la destilería)	2 577,46 (vapor disponible a la destilería)
Total Consumo de vapor escape	-	49 930,1(*)	49 977,28 (**)
Total consumo de vapor vegetal	-	50 702,9	61 996,02

Para determinar el valor de (*) se consideró que el calentador 4 es el único que consume vapor de escape de los calentadores que pueden trabajar con ambos vapores y para el valor de (**) se consideró que el calentador 3 es el único que consume vapor de escape de los calentadores que pueden trabajar con ambos vapores. Como resultado de los cálculos realizados se arribó a la siguiente conclusión: cuando no existe desvío de jugo a la producción de alcohol, los pre- evaporadores no producen el vapor necesario para suplir los requerimientos de vapor en la destilería, debido a que aunque aumenta la masa de jugo a tratar y se produce una mayor evaporación todo el vapor producido se consume en el proceso de producción de azúcar, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2
Vapor a generar en calderas según necesidades tecnológicas

Para proceso	47,14 t/h
Otros usos (3 %)	1,41 t/h
Pérdidas (2 %)	0,97 t/h
Total	49,52 t/h

Teniendo en cuenta los resultados de los balances se puede plantear que el consumo de vapor para la fabricación de azúcar se encuentra a tope, ya que la caldera tiene una capacidad de 50 t/h y el proceso está utilizando 49,52 t/h de vapor.

Por otra parte, los balances de combustible dieron resultados positivos, el consumo de bagazo es de 25,64 t/h, de una producción de 38,99 t/h según molienda lo que deja un sobrante de 12,99 t/h de bagazo.

Tabla 3
Resumen de los consumo de vapor en los equipos

Equipos	Consumos de vapor kg/h
Columna destilación	5536
Columna lavadora	960
Columna purificadora	2563,2
Columna recuperadora	256
Total	9 615,2

Teniendo en cuenta los resultados de los balance se llega a la conclusión que el consumo de vapor en las secciones de producción de alcohol técnico y extrafino se consume un total de 9,6 t/h de vapor. Ver tabla N° 3

Análisis de variantes con diferentes flujos de jugo y vapor a la destilería

Como se expresó anteriormente, en el esquema actual la demanda de vapor del proceso supera la capacidad instalada en el área de Generación de Vapor (50 t/h), en la búsqueda de alternativas que hicieran posible una disminución de este consumo se analizan variantes, las que se realizan teniendo en cuenta cambios en el esquema térmico, con variación de los flujos de materiales y los parámetros del proceso.

VARIANTE 1: El esquema actual con las mismas condiciones disminuyendo el Brix de la Meladura a 60°Bx.

VARIANTE 2: Igual a la Variante anterior pero considerando un consumo de vapor de la Destilería de 7 t/h, en este caso sólo se satisface la demanda de vapor para la obtención de alcohol técnico B, 93,5 °GL.

VARIANTE 3: Manteniendo el esquema actual pero sólo extrayendo el Jugo de los Filtros a la Destilería (en este caso se considera que es un 15 %) y el consumo de vapor de 10 t/h.

VARIANTE 4: Igual a la Variante #3 pero con un consumo de vapor a la Destilería de 7 t/h.

En todos los casos se utilizó el mismo método de cálculo que se empleó para la evaluación de la situación actual del sistema termoenergético de la fábrica y manteniendo el mismo esquema de evaporación existente. A continuación se muestran varias tablas comparativas con los principales resultados obtenidos en cada variante.

Tabla 4
Resumen de los consumos de vapor (t/h), de cada variante

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Calentador Primario	5,76	5,76	6,09	6,09
Calentador Rectificador	4,2	4,2	5,09	5,09
Calentador Jugo Claro	2,97	2,97	3,15	3,15
Calentador Jugo Destilería	3,01	3,01	1,56	1,56
Pre-evaporadores	46,48	44,1	50,36	48,05
Vaso I	12,05	12,79	13,91	14,62
Vaso II	6,36	7,09	7,91	8,62
Vaso III	6,87	7,61	8,48	9,2
Tachos	13,5	13,5	15,68	15,68
Destilería	10,0	7,0	10,0	7,0
Reductora 20/10 psig %	9,58	5,69	11,8	10,3
Perdidas	1,48	1,41	1,6	1,53
Consumo Total Proceso	50,93	48,48	54,11	51,83
Vapor a Generar en las Calderas	53,47	50,9	56,86	54,47

Como se puede apreciar de los resultados obtenidos en cada variante, la más favorable es la #2, donde se envía a la Destilería 30 m³/h de jugo (de Filtros y Diluidos) y el consumo de vapor es de 7 t/h, en este caso el consumo total de vapor del proceso es de 48,48 t/h y la cantidad de vapor a generar en las Calderas es 50,9 t/h que se corresponde prácticamente con la capacidad instalada en esta área, pero solamente se podría realizar la producción de alcohol técnico B, debido a que el suministro de vapor no es suficiente para el proceso completo.

En el caso en que se envíe menos jugo a la Destilería el consumo de vapor de proceso se incrementa ya que se elevaría la cantidad de agua a evaporar en el proceso así como la cantidad de azúcar a producir, elevándose el consumo de vapor en las áreas de Evaporación y Cocción.

Integración energética en la estación de evaporación

Las curvas de las corrientes en cuestión (fría y caliente), no existe una verticalidad entre las mismas lo que significa que no existe un aprovechamiento óptimo de las áreas de transferencia de calor de estos equipos.

Según los resultados obtenidos en el software las utilidades mínimas de calor son de 25 326,7KW, las cuales se pueden expresar en 45,8 t/h lo que nos dice que existe un sobreconsumo de 3,82 t/h en la estación de evaporación por parte de la tecnología instalada.

En el análisis anterior solamente se tuvo encuentra la estación de evaporación a continuación se realiza el mismo análisis pero con suministro de vapor hacia la destilería.

Análisis de los resultados del Pinch en la estación de evaporación con desvío de vapor a la destilería

En las curvas obtenidas se pudo apreciar que no existe verticalidad entre las mismas, lo que demuestra el mal aprovechamiento de las áreas de transferencia de calor de los equipos. El análisis del software arrojó además que se consumen 29 349,8 kW, que significan 51,1t/h de vapor.

Con los resultados obtenidos se puede plantear que en la variante de integración con suministro de vapor a la destilería, la caldera estaría trabajando a su capacidad nominal lo cual no es recomendable para la misma, por lo que se pueden plantear combinaciones en el proceso que contribuyan a disminuir el

consumo de vapor en el mismo, así como el uso más factible de las áreas de transferencia de calor de los equipos involucrados, lo que conllevaría a un mejor uso del área de generación y consumo de vapor dándole más confiabilidad al proceso de fabricación de azúcar así como al desvío de vapor a la destilería.

Sistema de cogeneración

Con los balances realizados, se demostró que el suministro de vapor del central a la destilería está limitado con la tecnología instalada. Debido a la importancia que representa una posible integración, se proponen sistemas más eficientes [13].

Para el análisis de las propuestas se comenzó con un estudio en la planta eléctrica debido a la importancia que tiene la misma en el proceso. Del balance en los turbogeneradores se obtuvo que el vapor de entrada a los mismos es de 44 975,82 kg/h de vapor.

Propuesta de esquema de cogeneración

Tomando como base todos los balances realizados se propone un aumento de la presión de vapor directo en la fábrica, con los esquemas que se mencionaron en la sección de materiales y métodos.

Tabla 5
Vapor de baja para las dos Variantes

Parámetro	Valor(2,8 MPa)	4 MPa(E-C)	Unidades
Masa Vapor Salida	60 000	80 000	kg/h
Temperatura Vapor Salida	205	210	°C
Temperatura Vapor Salida	478	483	K
Presión Vapor Salida	0,103	0,176	MPa (Man)
Presión Vapor Salida	0,204	0,276	MPa (Abs)
Entalpía Vapor Salida	2 836	2 887	kJ/kg
Entropía Vapor Salida	7,51	739	kJ/kgK

Tabla 6
Resultados de las variantes propuestas

	Potencia	6,0	11	MW
Parámetro		Valor (2,8 MPa)	4 MPa (E-C)	Unidades
Consumo de vapor		60 000,00	80 000,00	kg/h
Entrega de vapor a la salida		60 000,00	80 000,00	kg/h
Trabajo total eléctrico realizado (Wte)		6 626,17	1 2501,6	kW
Energía de Entrada		53 892,83	75 523,8	kW
Energía de Salida		47 266,67	63 022,2	kW
Exergía de Entrada		19 409,37	29 155,1	kW
Exergía de Salida		10 513,93	14 018,6	kW
Destrucciones		2 269,27	2 634,98	kW
Rendimiento exergético		74,49	82,59	%
Eficiencia exergética		71,5	3,01	%

Como se puede apreciar en los resultados, los parámetros analizados en las variantes propuestas, son superiores a los del sistema instalado en la fábrica, teniendo en cuenta que las eficiencias exergética de los turbogeneradores debe ser superior al 80 % y el valor de la segunda variante está por encima de la misma, se procede a realizar la propuesta de inversión con ésta.

Se realiza la evaluación económica de la integración de los procesos de azúcar y alcohol incluyendo el esquema de cogeneración propuesto, así como el equipamiento auxiliar de tuberías y tanques de almacenamiento intermedio.

Para la estimación de los costos involucrados en el análisis se tuvo en cuenta las propuestas del equipamiento:

- Generador de 80 t/h y 4 MPa de presión
- Un turbogenerador de 11 kW de potencia y 4 MPa de presión.
- Tuberías para el suministro de vapor a la destilería.
- Tuberías para el suministro del jugo a la destilería.
- Tanque de almacenamiento de jugo en la fábrica de azúcar
- Tanques de almacenamiento de jugo en la fábrica de alcohol.

A continuación en la tabla N° 7 se presenta una estimación de los costos de producción

Tabla 7
Estimación de los costos de producción

	Costo, \$/a
Materias Primas	33 796 883,80
Costos variables	37 749 934,169
Costos Fijos	1 446 387,769
Costos de producción	39 631 638,058
Costo Total de Producción	41 418 992,598

Finalmente se calculan los indicadores dinámicos de rentabilidad VAN, TIR y el período de recuperación de la inversión dando como resultado los valores que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8
Indicadores dinámicos del proyecto de inversión

Indicadores Dinámicos	Valor
VAN, \$	74 839 468
TIR, %	92
PRD, año	3

Los resultados obtenidos son favorables para la realización de la inversión, ya que el período de recuperación de la inversión es sólo tres años.

Conclusiones

- 1. Como resultado de los balances de masa y energía en los procesos de fabricación de azúcar y alcohol se demostró que el consumo de vapor de escape en el proceso azucarero es de 49,52 t/h y el de la destilería 9,6 t/h, por tanto se excede la capacidad nominal de la caldera, 50 t/h, lo que limita el estudio de integración en estos procesos.**
- 2. Con el desvío de 30 m³/h de jugo y 10 t/h de vapor a la destilería como parte del estudio de integración energética, se comprueba que el consumo de vapor es de 53,79 t/h, lo que también muestra la imposibilidad de integración con el sistema de cogeneración actual.**
- 3. En el análisis de las variantes tecnológicas de integración se determinó que la más factible es en la que se destinan a la**

- destilería 7 t/h de vapor y la meladura con 60°Bx, pero la misma tiene el inconveniente de que sólo satisface los requerimientos energéticos para la producción de alcohol técnico B.*
- 4. En el análisis Pinch se obtuvo que el proceso de producción de azúcar tiene un sobreconsumo de 3,82 t/h de vapor y que la variante que considera el suministro de vapor a la destilería demanda 51,1 t/h de vapor, valor que limita la integración de estos procesos.*
 - 5. De las variantes evaluadas sólo se logra la factibilidad técnica de integración energética en la que se propone un sistema de cogeneración con un generador de vapor de mayor capacidad y un turbogenerador de mayor potencia, resultado esto además en una mayor producción de electricidad.*
 - 6. La evaluación económica para la integración de los procesos de azúcar y alcohol incluyendo el esquema de cogeneración propuesto, así como el equipamiento auxiliar, demostró la factibilidad económica con indicadores positivos de VAN y TIR y un período de recuperación de la inversión de 2 años.*

Bibliografía

1. DIAS Marina, *et al.* "Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process". *Chemical Engineering Research and Design*. 2009, vol 87, p.1206-1216.
2. PELLEGRINI, Luiz F., *et al.* "Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermo-economic and environmental analysis and optimization". *Energy*. 2010, vol 36, p. 3704-3715.
3. WALTER Arnaldo, *et al.* "Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues". *Energy*. 2010, vol 35, p. 874-879.
4. BUDDADEE Bancha, *et al.* "The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: a case study for Thailand". *Environmental Impact Assessment Review*. 2008, vol 28, p.380-391.

5. CARDONA, Carlos, *et al.* “Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities”. *Bioresource Technology*. 2007, vol 98, p. 2415–2457.
6. DUNN, Russel F., *et al.* “Using process integration technology for cleaner production”. *Journal of cleaner production*. 2001, vol 9, p.1-23.
7. CHANTASIRIWAN, Somchart. “Simulation of Quadruple-Effect Evaporator with Vapor Bleeding Used for Juice Heating”. *International Journal of Food Engineering*. 2016, vol 2, núm. 1, p. 36-41.
8. JYOTI Ghoshna, *et al.* “Simulation of heat integrated multiple effect evaporator system”. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014, vol 7, p. 110-117.
9. LAM Hon, *et al.* “Software tools overview: process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction”. *Chemical Engineering Transactions*. 2010, vol 21, p. 487-492.
10. ENSINAS, Adriano, *et al.* “Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane”. *Energy Conversion and Management*. 2007, vol 48, p. 2978-2987.
11. SHARAN Prashant, *et al.* “Energy Integration of Multiple Effect Evaporators with Background Process and Appropriate Temperature Selection”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, vol 55, núm.6, p. 1630–1641.
12. MODESTO Marcelo, *et al.* “Ethanol production from sugarcane: assess of possibilities of decrease of thermal energy consumption through exergetic cost analysis”. *Heat Transfer Engineering*, 2009, vol 30, núm. 4, p. 272-281.
13. MORANDIN Matteo, *et al.*, “Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system”. *Energy*. 2010, vol 36, p. 3675-3690.