

INTEGRACIÓN DE PROCESOS Y ANÁLISIS DE COGENERACIÓN EN LAS PRODUCCIONES DE AZÚCAR Y ALCOHOL

PROCESS INTEGRATION AND COGENERATION ANALYSIS IN THE SUGAR AND ALCOHOL PROCESS PRODUCTION

Luis Dayro Pérez Ramos¹, Meilyn González Cortés^{2} y Rubén Espinosa Pedraja²*

¹ Dirección Técnica. Empresa Pulpa Cuba, Trinidad, Sancti Spiritus.

² Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 23, 2014; Revisado: Julio 21, 2014; Aceptado: Agosto 30, 2014

RESUMEN

Se evaluó la posibilidad de integración de los procesos de fabricación de azúcar y alcohol en una empresa que consta de una fábrica de azúcar y aledaña a la misma hay una destilería de alcohol.

Se utilizaron herramientas de integración como el análisis pinch para el estudio de las corrientes energéticas los cuales arrojaron resultados conservadores.

Tomando como base los resultados obtenidos en cada uno de los análisis se realizaron los cálculos de consumo de vapor en los turbogeneradores, rendimiento, eficiencia exérgica y otros, para un mejor conocimiento del estado operacional de los mismos, siendo estos por debajo de las normas técnicas establecidas, por lo que se propuso un cambio en el sistema de cogeneración para un mejor aprovechamiento del sistema obteniéndose valores superiores de los rendimientos y eficiencias que en la tecnología instalada.

De los balances económicos realizados en la estación de cogeneración 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, obteniendo mayores ganancias en ambos.

Palabras clave: Integración de procesos, cogeneración, azúcar, alcohol, pinch

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Meilyn González, Email: mgonzalez@uclv.edu.cu

ABSTRACT

It was evaluated the possibility of integration of the processes of production of sugar and alcohol in a company that consists from a factory of sugar close to alcohol distillery.

Integration tools such as pinch analysis were used for the study of the energy currents which conservative results.

Taking like base the results obtained in each one of the analyses were carried out the calculations of steam consumption in the turbogenerators, exergetic efficiency and other, for a better knowledge of the operational state of the same ones, being these below the established technical norms, for what intended a change in the cogeneration system for a better use of the system obtaining higher values of yields and efficiencies that in the installed technology.

Economic balances carried out in the cogeneration station 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, obtaining bigger earnings in both.

Key words: Process integration, cogeneration, sugar, alcohol, pinch

1. INTRODUCCIÓN

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 eminente.

A medida que se han ido estudiando las posibilidades antes planteadas se han sumado barreras para la integración, de estas se pueden plantear los años de explotación de los equipos de estas industrias lo que conlleva a grandes inversiones para aplicar los cambios, también se deben tener un balance apropiado en los procesos involucrados para garantizar las materias primas de cada uno individualmente y no se afecten los procesos involucrados provocando paradas generalizadas.

Para Cuba sería de gran importancia que la producción de azúcar dejara un mayor excedente de bagazo, pero para lograrlo las plantas tendrían que ser altamente eficientes, por lo que es necesario realizar un balance que garantice un equilibrio entre los consumos de energía térmica y eléctrica, así como en las posibilidades de integración de estos procesos. Es por lo anterior que en este artículo se pretenden evaluar alternativas de integración de los procesos de azúcar y alcohol, así como un sistema de cogeneración de mayor eficiencia que resulten en un complejo productivo sostenible desde el punto de vista técnico y económico, considerando como único insumo básico la caña de azúcar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En años anteriores se ha estudiado la posibilidad de realizar una integración de procesos eficiente, económica y rentable, (Dunn, 2000), (Catá, 2004), (Ensinas 2007). La cual se basa en que de la obtención de productos principales, corrientes residuales u otras corrientes se puedan utilizar en otros procesos haciendo de dos o varios procesos que

una vez fueron independientes hasta un punto se conviertan en un complejo industrial por así llamarlo.

Existe una nueva realidad, que prevé vender excedentes de electricidad por las fábricas así como el empleo del bagazo como materia prima para otros procesos, (Lam, 2010), (Pelligrini, 2010), (Morandin, 2010); 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).

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 y sistemas de integración térmica más eficientes.

2.1. Balances de masa y energía en el proceso de fabricación de alcohol

Esquema energético de la fábrica de azúcar

Se trabaja con dos calderas de 25 toneladas/hora de generación de vapor con una presión de 250 lbs/ plg² y 320 °C.

Los consumidores primarios son dos turbos generadores de 1,5Mw; de procedencia alemana de segunda y tercera generación a 250 lbs/ plg² y 320°C y una turbina Skoda de 150 lbs/plg².

El esquema de uso de vapor para el proceso es el siguiente: existen dos válvulas reductoras, una de 250-150 lbs/ plg² y otra de 250-20 lbs/ plg². El vapor destinado a la limpieza es de la línea de 150 lbs/ plg². La alimentación de los pre evaporadores se realiza de la línea de 20 lbs/ plg² 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 en los calentadores primarios. En la línea de 20 lbs/plg² hay instalada una reductora de 20-10 lbs/ plg² de la misma se suministra vapor a los tachos y a los calentadores del jugo destinado a la destilería, que en estos momentos no se realiza esta operación.

Los cálculos realizados en el proceso de producción de alcohol fueron en los principales equipos consumidores de vapor y energía, en este caso las columnas. En la destilería existen tres tipos de producciones:

- Producción de alcohol técnico B.
- Producción de alcohol extrafino.
- Producción de aguardiente.

Para la realización de los balances solo se tuvieron en cuenta las dos primeras producciones, ya que en la destilería no se está produciendo aguardiente, y los datos necesarios para los cálculos son de fabricaciones de años anteriores y no existe información actualizada.

2.2. Integración energética en la fabricación de azúcar y alcohol

Se realiza un análisis en el sistema de cogeneración actual con la realización de desvío a la destilería de 30 m³/h de jugo y de 10 t/h de vapor.

Este consumo total 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.

Si se considera que las pérdidas por fugas, purgas, mal aislamiento térmico más el vapor necesario para dar escoba como 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). Este alto consumo puede provocar arrastres de sólidos en el vapor, afectando con incrustaciones las tuberías y equipos primarios (Turbogeneradores).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1. 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 2. Resumen de los consumo de vapor en los equipos

<i>Equipos</i>	<i>Consumos de vapor Kg/h</i>
Columna destilación	5536
Columna lavadora	960
Columna rectificatriz	2563,2
Columna recuperadora	256
Total	9615,2

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.

3.1. 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 hagan 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.

VARIANTE #3: Manteniendo el esquema actual pero solo extrayendo el Jugo de los Filtros a la Destilería (en este caso se considera que es un 15%) y el consumo de vapor de esta 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 3. Resumen de los consumos de vapor (t/h), de cada variante

	<i>Variante</i> #1	<i>Variante</i> #2	<i>Variante</i> #3	<i>Variante</i> #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.

3.2. Integración energética en la estación de evaporación

El análisis Pinch se realizará para ver de forma eficiente los verdaderos requerimientos de energía de la etapa de evaporación a través la integración energética. Del análisis Pinch se obtienen los requerimientos de utilidades de las corrientes frías y calientes que requiere el proceso para trabajar de forma más eficiente.

Para realizar la integración energética se emplea el ASPEN Pinch, los datos para el análisis se importan de la simulación del ASPEN PLUS o se pueden introducir directamente. En este caso se introducirán los datos de las corrientes en estudio:

- Flujos másicos 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.

3.3. Análisis de los resultados del Pinch

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 25326,7KW, 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.

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

En las curvas obtenidas en esta corrida no existe tampoco una verticalidad entre las mismas, lo que demuestra lo anteriormente planteado acerca del mal aprovechamiento de las áreas de transferencia de calor de los equipos.

El análisis del software arrojó que se consumen 29349,8 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.

3.4. Sistema de cogeneración

Con los balances realizados anteriormente, se demostró que el suministro de vapor del central a la destilería está limitado con la tecnología instalada en la actualidad. Debido a la importancia que representa una posible integración, en éste se proponen sistemas más eficientes, (Peter, 2007), (Morandin, 2010).

Para el análisis de las propuestas se comenzará 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 44975,82 Kg/h de vapor.

3.4.1. Propuesta de la tecnología de cogeneración

Tomando como base todos los balances realizados se propone un aumento de la presión de vapor directo en la fábrica. Se calcularán dos variantes, la primera incluye un generador que produce 70 t/h de vapor con una presión de 2,8 MP (410 lb/plg²) 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 lbs/plg²) 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.

Tabla 4. Vapor de baja para las dos Variantes

<i>Parámetro</i>	<i>Valor (2,8 MPa)</i>	<i>4 MPa(E-C)</i>	<i>Unidades</i>
Masa Vapor Salida	60000	80000	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	2836	2887	kJ/kg
Entropía Vapor Salida	7,51	739	kJ/kgK

Tabla 5. Resultados de las variantes propuestas

<i>Parámetro</i>	<i>Potencia</i>	<i>6,0</i>	<i>11</i>	<i>MW</i>
	<i>Valor (2,8 MPa)</i>	<i>4 MPa</i>	<i>(E-C)</i>	<i>Unidades</i>
Consumo de vapor	60000,00	80000,00		kg/h
Entrega de vapor a la salida	60000,00	80000,00		kg/h
Trabajo total eléctrico realizado (Wte)	6626,17	12501,6		kW
Energía de Entrada	53892,83	75523,8		kW
Energía de Salida	47266,67	63022,2		kW
Exergía de Entrada	19409,37	29155,1		kW
Exergía de Salida	10513,93	14018,6		kW

Destrucciones	2269,27	2634,98	kW
Rendimiento exergético	74,49	82,59	%
Eficiencia exergética	71,5	83,01	%

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 la eficiencia 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 esta.

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 son:

- 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.

Tabla 6. Estimación de los costos de producción

<i>Aspecto</i>	<i>Costo, \$/a</i>
Materias Primas	33796883,80
Costos variables	37749934,169
Costos Fijos	1446387,769
Costos de producción	39631638,058
Costo Total de Producción	41418992,598

Finalmente se calculan los indicadores dinámicos de rentabilidad VAN, TIR y el período de recuperación de la inversión obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 7. Resultados de los indicadores dinámicos de rentabilidad

<i>Indicador Dinámico</i>	<i>Valor</i>
VAN, \$	74839468
TIR, %	92
PRD, año	2

Los resultados obtenidos son favorables para la realización de la inversión, ya que el período de recuperación de la inversión es 2 años

4. 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.

REFERENCIAS

- Catá, Y., Alternativa de Integración material y energética considerando la incertidumbre en una fábrica de azúcar y otras plantas de derivados., Conferencia impartida en el Instituto de Desarrollo y Diseño, INGAR, Santa Fe, Argentina. 2004
- Dunn, R. Using process integration technology for cleaner production., *Journal of cleaner production*, Vol. 30. No.4, 2000, pp. 687-695.
- Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Lozano, M.A., Serra, L.M, Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane., *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, 2007, pp.2978-2987.
- Lam, H. L., Klemeš, J., Friedler, F., Kravanja, Z., and Varbanov, P., Software tools overview: process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction., *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 21, 2010, pp. 487-492 DOI: 10.3303/CET1021082
- Morandin, M, et al., Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system., *Energy*, doi:10.1016/j.energy.2010.10.063, 2010.
- Pellegrini, L. F., Oliveira, J., Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermo-economic and environmental analysis and optimization., *Energy* (2010), doi:10.1016/j.energy.2010.08.011, 2010.
- Peter Rein, Cane Sugar Engineering. Verlad Dr. albert Bartens KG-Berlin, 2007.