

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE CO-GENERACIÓN PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA

Yuranni Pérez, Juan Carlos Acevedo y Viatcheslav Kafarov,
Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía,
Universidad Industrial de Santander, Colombia

Erenio González,
Centro de Análisis de Procesos, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas,
Santa Clara, Cuba

Recibido:

Aceptado:

El trabajo expone la necesidad de evaluar diferentes esquemas de cogeneración en la industria del azúcar de caña de Colombia en el proceso de asimilación de tecnologías para la producción de etanol. Para realizar la investigación se evaluaron dos posibles esquemas de cogeneración utilizando los sistemas de simulación *GT PRO* y *STEAM PRO*. Finalmente se elaboraron conclusiones y recomendaciones sobre la aplicación de los resultados de la investigación.

Palabras clave: Cogeneración, etanol, industria azucarera.

EVALUATION OF COGENERATION PROCESS FOR INCREASE OF ENERGETIC EFFICIENCY IN FUSEL ETHANOL PRODUCTION IN THE SUGAR INDUSTRY OF COLOMBIA

In the work is exposed the necessity of value different of cogeneration schemes in the sugar industry of Colombia in the technological assimilation for the ethanol production. For to realize the investigation are analyzed two schemes possible of cogeneration used the simulation systems *GT PRO* y *STEAM PRO*. Finally, are elaborated conclusion and recommendations about the applications of the result of investigation.

Key Words: Cogeneration, ethanol, sugar industry.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la producción de biocombustibles se ha desarrollado debido a una serie de incentivos legales, mediante la implementación de leyes que establecen el uso de bioetanol en mezclas

con los combustibles de origen fósil, como una estrategia para frenar la dependencia del petróleo y aprovechar los beneficios ambientales que el uso de estos combustibles proporciona. La Ley de Alkoholes Carburantes (Ley 693 de 2001) estipula que a partir del 2005 las gasolinas colombianas

deben estar oxigenadas con un 10 % de alcohol de la caña de azúcar y otras fuentes potenciales. Con esto, se puede esperar un impacto positivo sobre el medioambiente, y en consecuencia en la salud de las personas que habitan las ciudades. Los efectos positivos sobre el medio ambiente se deben a que los biocombustibles son compuestos biodegradables, reducen la emisión de gases tóxicos de los vehículos tradicionales, reducen el efecto invernadero, sus residuos pueden ser usados como fuente de energía para cogeneración, y disminuyen el consumo de combustibles fósiles contaminantes. Todos estos beneficios indican que la producción y procesamiento del bioetanol representa una gran oportunidad de negocio tanto para el sector agroindustrial como para el resto del país.

La caña de azúcar, en sus diferentes variedades, es el cultivo que ofrece una mayor cantidad de materia prima para obtener bioetanol en Colombia, el sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, región donde hay más de 200,000 hectáreas sembradas de caña. Gracias a su clima privilegiado puede cosecharse caña durante todos los meses del año. Esta condición agroclimática, ha llevado a que la región se especialice en este cultivo, y obtenga rendimientos superiores a las 110 X de caña por hectárea y alrededor de 13 X de azúcar por hectárea al año.

Actualmente, existen 22 ingenios en operación de los cuales 5 poseen destilerías anexas para la producción de bioetanol como respuesta a la ley de oxigenación de la gasolina vehicular (ASOCA-ÑA, 2006-07). A diferencia de Brasil donde los ingenios azucareros normalmente están diseñados para la producción dual etanol-azúcar, donde hay una mayor eficiencia energética dado que usan bagazo para la generación de energía en ambos procesos, en Colombia como consecuencia de la evolución histórica de los fenómenos técnicos y económicos, al irrumpir la era del bioetanol, los "Ingenios", han tenido un criterio guía más adaptativo que preventivo, de reconversión de instalaciones existentes que de diseño de nuevas instalaciones, ocasionando un aumento en el requerimiento energético en estos, por lo que se han visto obligados a instalar nuevos sistemas de cogeneración que les proporcionen energía térmica y eléctrica para autoconsumo y comercialización de excedentes.

Aunque la cogeneración de energía es ya tradicional en el sector azucarero colombiano, los precios relativos de la energía eléctrica de la red pública, hacían poco atractivo vender excedentes y la cogeneración se orientó a autosuficiencia y consumo interno. El rápido aumento de precios de la energía de la red pública, durante los últimos años convierte el vender energía eléctrica en la posibilidad de un nuevo producto del sector.

Las cañas del Valle del Cauca poseen un alto contenido de fibra (promedio 13,5 %) lo que desde el punto de vista de cosecha, preparación, etc. es una desventaja, aunque es una ventaja desde el punto de vista de producción de biomasa en el momento que se decida utilizarla para la producción de energía. Uno de los subproductos de la caña que ha venido aumentando su importancia en los últimos años es el bagazo, luego de considerarse prácticamente un desecho hasta hace unas cuantas décadas, se ha convertido en un subproducto muy valorado, por su valor energético como combustible.³ En Colombia, de los seis millones de toneladas de bagazo producidos al año por los ingenios, un 85 % es utilizado como combustible. De esta manera, el bagazo ha llegado a ser el combustible principal de las calderas de los ingenios, con el fin de generar su propia energía para sus procesos productivos y para la comercialización de excedentes.⁵ Con la promulgación de la Resolución Comisión de Regulación de Energía y gas (CREG, 1996) se regulan las actividades de cogeneración conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), se abren las puertas al aprovechamiento del potencial energético de la caña de azúcar. A partir de ese momento los ingenios tienen la posibilidad de modernizar sus plantas para hacerlas eficientes energéticamente y lograr excedentes de generación de energía eléctrica que pueden venderse en la red pública.

De acuerdo con Szklo y Tomalsquim¹⁰ la cogeneración es un proceso cuya aplicación data desde principios del siglo pasado en ingenios azucareros, plantas de papel, siderúrgicas y otros procesos. Su aplicación obedecía al propósito de asegurar el abastecimiento de energía eléctrica que en esos años era insuficiente y no fiable. Conforme las redes eléctricas se extendieron y el suministro de energía eléctrica se hizo más fiable, fue resultando más barato abastecerse directamente de la red pública. Así, los

proyectos de cogeneración poco a poco se fueron abandonando. Sin embargo, debido al incremento en el costo de la energía eléctrica, a la problemática ambiental y al desarrollo tecnológico de los equipos, la cogeneración vuelve a ser rentable y por ello renace en el ámbito industrial. Las plantas de cogeneración son de creciente interés en Colombia, ya que representan la única posibilidad de generación de electricidad por parte del sector privado.

La definición de cogeneración⁹ es un proceso mediante el cual se generan dos o más formas de energía de manera simultánea agotando únicamente una fuente principal de energía. La ventaja que ofrece la cogeneración en comparación con la generación convencional de energía es el incremento de la eficiencia debido a la recuperación térmica adicional. Por esta razón, las plantas de cogeneración surgen como una opción altamente recomendable para la conservación de recursos en la producción de energía. Las plantas de cogeneración permiten satisfacer las demandas de calor y electricidad de manera eficiente. Para ello existen diversas opciones tecnológicas donde es posible tener cogeneración: un sistema de caldera con turbina de vapor a extracción-condensación, motores de combustión interna cuyos gases de escape se enfrían para producir calor en forma de vapor de proceso, ciclos combinados con cogeneración, entre otros.

El potencial de cogeneración en el país para el sector azucarero como para otros sectores, según el Plan Energético Nacional, liderado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 1994), podría llegar a ser por lo menos de 423 MW adicionales, con una contribución de los sectores de la alimentación bebidas y tabaco, papel y textil, entre otros. En todas las evaluaciones, el sector azucarero se ha señalado como el de mayor potencial tanto por la disponibilidad de recursos de biomasa como por los requerimientos de vapor para el procesamiento de la caña de azúcar, lo que también está presente en la producción dual de azúcar y etanol⁷ y seguro será factible en las producciones conjuntas de biodiesel y etanol.⁸

El propósito de este trabajo es identificar y evaluar diferentes tecnologías para los sistemas de cogeneración a partir de bagazo en la producción

de bioetanol combustible que puedan ser aplicadas en la industria azucarera colombiana, y satisfacer las demandas tanto de vapor como de electricidad fijadas en las plantas.

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta las características de la industria azucarera colombiana se seleccionaron dos sistemas de cogeneración para el estudio de las diferentes alternativas que podrían emplearse en las plantas de producción de azúcar y bioetanol. Los sistemas en todo momento satisfacen las demandas de energía eléctrica y de vapor del usuario, además, los sistemas son capaces de operar en paralelo con la red eléctrica local, tomando de ella (en caso de ser necesario) faltantes eventuales o vertiendo en ella los excedentes. Las simulaciones se desarrollaron con *GT PRO* y *STEAM PRO*, los cuales son programas especializados en la simulación de plantas de generación de energía eléctrica, con ciclos combinados (turbinas de gas y de vapor) y ciclos de vapor, respectivamente.

Configuración I

En el diagrama de flujo ilustrado en la figura 1 se estudia un ciclo de vapor que utiliza turbinas de vapor de condensación. En la caldera se produce vapor de agua a diferentes presiones (alta, intermedia y baja) que luego es llevado hasta las turbinas (HTP, IPT, LPT) donde se expande generando trabajo para la producción de energía eléctrica. Parte del vapor que sale de la turbina IPT es aprovechado en el proceso de producción de azúcar y bioetanol. En este caso, el proceso de producción de azúcar y bioetanol determina la producción de vapor en la caldera.

Configuraciones II

En el esquema mostrado en la figura 2 se emplean una turbina de gas y una de vapor.

Los gases de escape provenientes de la turbina de gas son aprovechados en el recuperador de calor (HRSG) para producir vapor que posteriormente será usado en la turbina de vapor para producir por segunda vez energía eléctrica.

Tabla 1. Parámetros adoptados para los sistemas de cogeneración

Parámetro	Valor
Temperatura atmosférica del aire (°C)	25
Presión atmosférica del aire (kPa)	101,3
Bagazo LHV (kJ/kg bagazo)	8578
Eficiencia térmica de la caldera (%)	85
Eficiencia isentrópica de turbinas de vapor (%)	80
Eficiencia isentrópica de bombas (%)	80
Eficiencia de generador eléctrico (%)	96
Eficiencia de motor eléctrico (%)	96

Tabla 2. Características del bagazo

Bagazo	Base húmeda	Base Seca
Bagazo (t)	8502,3	--
Bagazo (t/h)	12,6	--
Bagazo caña	30,3 %	--
Humedad	48,6 %	--
Cenizas	5,00 %	9,72 %
Carbono	22,38 %	43,52 %
Hidrógeno	3,09 %	6,02 %
Oxígeno	20,95 %	40,74 %
Nitrógeno	0,00 %	0,00 %
Azufre	0,00 %	0,00 %
Total	100,0 %	100,0 %

RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

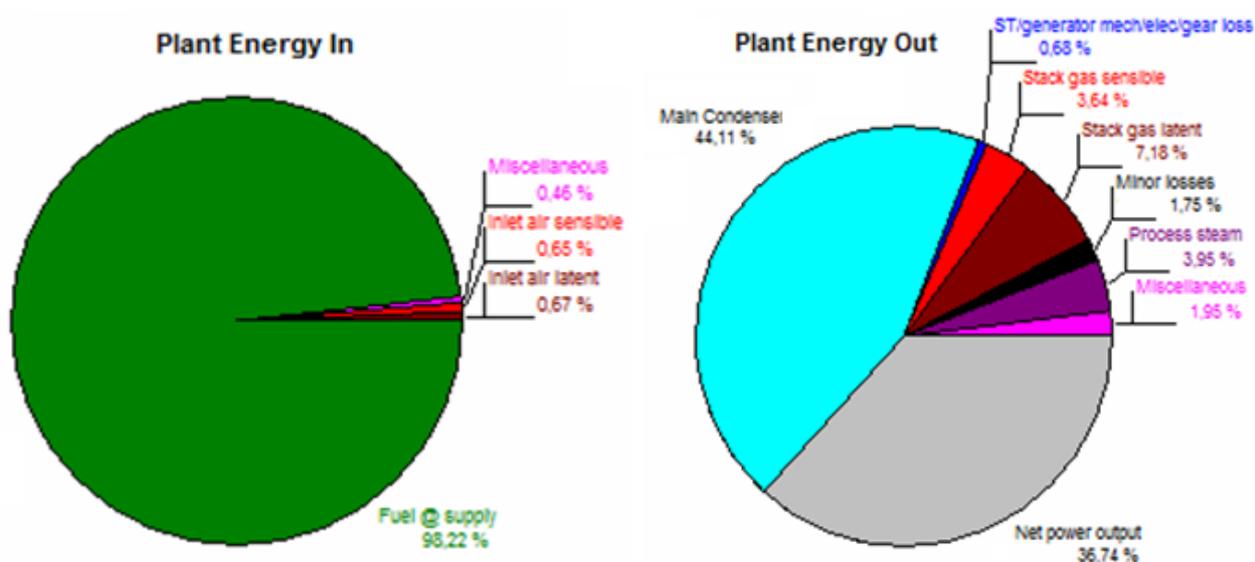


Figura 3. Entradas y Salidas de Energía para el Ciclo de Vapor (Figura 2)

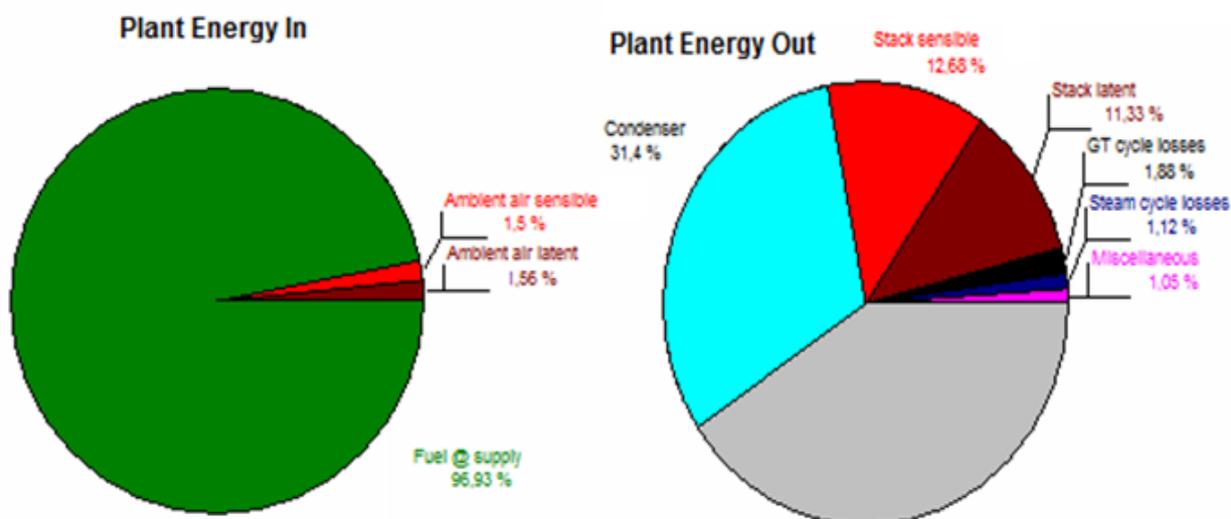


Figura 4. Entradas y Salidas de Energía para el Ciclo Combinado (Figura 1)

En las figuras 3 y 4 se muestra porcentualmente la entrada y salida de energía para los ciclos representados en las figuras 1 y 2. Para ambas configuraciones se aprecia que la principal fuente de energía es proporcionada por el combustible, que en este caso, es el bagazo de caña.

Observando los diagramas de energía saliente para cada una de las configuraciones, se tiene que en el ciclo combinado hay un mayor aprovechamiento de la energía suministrada por el bagazo, debido a la utilización de los gases de combustión que salen de la turbina de gas, como fuente de energía en la obtención de vapor para la producción de energía eléctrica adicional en la turbina de vapor. La salida neta de potencia en el ciclo combinado es alrededor de 41 % del total saliente. También se observa en el ciclo combinado una salida de energía considerable (24 %) correspondiente a calor sensible y latente que aún puede ser aprovechado, evitando arrojarlo al medio ambiente.

En cuanto al ciclo de vapor aunque las salidas de energía correspondientes a los calores latente y sensible son menores que en el ciclo combinado, se observa que la mayor cantidad de energía sale en el condensador (alrededor del 44 %), indicando un menor aprovechamiento de la energía del bagazo y, por consiguiente, una reducción de eficiencia global del proceso.

Las salidas de energía correspondientes a las pérdidas son ligeramente mayores en el ciclo combinado, ya que la complejidad de los equipos es mayor, contribuyendo de esta manera a tener procesos un tanto más irreversibles (principio de incremento de entropía).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las configuraciones propuestas cumplen con los requerimientos de energía eléctrica y térmica demandadas por el proceso con excedente de energía eléctrica que puede ser comercializada a través del sistema de interconexión nacional, representando para los ingenios colombianos un producto con valor agregado.

La gasificación de la biomasa basada en ciclos de energía puede ser una alternativa para los excedentes de la generación de electricidad en plantas de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar a largo plazo.

El bagazo de caña se propone como una alternativa ideal de combustible en plantas de cogeneración autosuficientes en términos de suministro de energía, además este combustible cumple con los postulados del protocolo de Kyoto dentro del marco de de-

sarrollo limpio, gracias a que se disminuyen emisiones contaminantes al usar un combustible de origen agrícola.

En las turbinas de vapor de condensación la expansión del vapor puede llegar a producir vapor húmedo lo que disminuye el rendimiento del equipo debido a la corrosión que se puede generar (el fabricante de la turbina debe dar un límite de la proporción de líquido en el vapor). Para aumentar la eficiencia del ciclo se propone usar equipos de recalentamiento para retornar el vapor a la salida de la turbina a sus condiciones iniciales (antes de entrar en la turbina) y de esta manera puede ser expandido nuevamente en otra turbina.

Otra alternativa es calentar el agua a la salida del condensador con una corriente de los escalonamientos intermedios de la turbina (solo en caso de turbinas multietapas). Una vez calentada esta corriente, se introduce un calor sensible que facilita la evaporación del agua en la caldera, aumentando de esta forma el rendimiento del equipo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Colombiano de Ciencia y Tecnología “Francisco José de Caldas por el apoyo al desarrollo del programa estratégico “RC 336-2007” y a la Red CYTED “Nuevas Tecnologías para la obtención de Biocombustibles” proyecto 306RT0279 (Código UNESCO: 330303, 332205, 530603, 330399).

BIBLIOGRAFÍA

1. Paquete Software Thermoflow. Thermoflow Inc.
2. Ley 693, *Ley de alcoholes carburantes*, Diario Oficial No. 44.564, septiembre 27 de 2001.
3. AGÜERO C. J.; J. R. PISA Y R.L. ANDINA: “Consideraciones sobre el aprovechamiento racional del Bagazo de caña como combustible.” *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*. Año 15 N° 27, Universidad Nacional de Tucuman, Argentina, 2006.

4. ASOCAÑA. Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. *Informe Anual 2006-2007*. (Disponible vía Web en <http://www.asocana.com.co>)
5. CAICEDO, G.; A. L. VIVAS; C. CAÑON; A. CARVAJAL Y A. L. GÓMEZ.: Optimización energética en el Ingenio Providencia. *Memorias Congreso de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar VII 2*, pp. 91-98, 2006.
6. Comisión de regulación de energía y gas. Resolución 85 de 1996, Octubre 15, *Diario Oficial No. 42.906 de Octubre 25 de 1996*.
7. ENSIMAS, A.; S. NEBRA; M. LOZANO Y L. SERRA: “Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane.” *Energy Conversion and Management* 48: 2978-2987, 2007.
8. KAFAROV V.; K. OJEDA Y E. SANCHEZ: “Diseño de producción conjunta biodiesel-bioetanol.” *Revista Energía y Computación* 15(1):9-14, 2007.
9. NAJAR, Y. S. AND M. AKYURT: Combined cycles with gas turbine engines, Heat recovery systems v. 14: 93-103, 1994.
10. SALEM SZKLO, A. AND M. TIOMNO TOMALSQUIM: Analysis of Brazil’s cogeneration legal framework, *Energy conversion and management* v. 44: 369-380, 2003.
11. UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. (disponible vía Web en <http://www.upme.gov.co>.)
12. VILLARES, MARIO: *Cogeneración*. segunda edición, Editorial Fundación Confemetal, Madrid, España, 1993.