

# APUNTES PARA UNA ESTRATEGIA EN EL DESARROLLO DE LA ENERGÉTICA AZUCARERA

Oscar Almazán del Olmo, Alfredo Torres Fernández, Electo Eduardo Silva Lora,  
José Carlos Escobar Palacio

## RESUMEN

El trabajo realiza un análisis cuidadoso acerca de la distribución de la demanda de energía térmica y eléctrica en el central azucarero, significando las estaciones de máximo insumo, así como los indicadores que califican la efectividad de la operación. La cogeneración y las alternativas tecnológicas que posibilitan los más altos niveles de entrega de electricidad a la red, junto a la valoración de las alternativas para lograr una alta eficiencia de generación y empleo energético, recuperando bagazo excedente para su empleo como materia prima en los procesos de derivados (tableros, pulpas y papeles, etc.) y como suministro base para la producción de biocombustibles de segunda generación, en su integración en el esquema de las biorrefinerías.

**Palabras clave:** Cogeneración, consumo de vapor, biorrefinerías.

## Abstract

The work presents a careful analysis about the distribution of the thermal and electric energy demands in a sugarcane mill; stressing, significantly, those stations of higher demand, as well as the indicators which qualify the effectiveness of the operations.

The cogeneration and the technological alternatives that allow a maximum figures of surplus energy to be supplied to the national grid; together with the evaluation of the best ways to reach the highest efficiency in the generation and use of thermal and mechanical energy, the recovering of the surplus bagasse to be used as raw material for co products (particle and fiber boards, pulps, papers, chemicals, etc), as fuel to cover the mill demands, to generate electricity in off season and as feedstock for second generation biofuel production, integrated in a Biorefinery scheme.

**Key words:** cogeneration, steam consumption, biorefineries

## 1. INTRODUCCION

Desde sus orígenes y a lo largo de su evolución hasta el presente siglo, la industria azucarera ha tenido en el problema energético un factor clave para su desarrollo tecnológico. Tan esencial ha resultado, que es la necesidad de satisfacer sus demandas de energía para el proceso lo que lleva, como hilo conductor, a través de la búsqueda por sistemas de mayor eficacia energética, a la transformación de la tecnología y la elevación de los rendimientos.

Actualmente la producción azucarera, y más recientemente de azúcar y alcohol, conserva un papel importante en la economía cubana y de varios países de América Latina. La producción y uso de la energía a ella asociada resulta, cada vez más, cuestión del mayor interés y atención, por cuanto sus posibilidades la hacen elemento de enorme atractivo en el propósito de contribuir a satisfacer la demanda de electricidad, diversificar la producción azucarera y favorecer su viabilidad económica.

Razón tal obliga a establecer una estrategia coherente y bien fundamentada que permita a ese potencial expresarse plenamente.

Este artículo resume la experiencia de varios años de trabajos conjuntos del Dr. Oscar Almazán del Olmo del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), con los investigadores del Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica Distribuida (NEST) de la Universidad Federal de Itajubá, en Brasil.

## 2. DE LAS PREMISAS

Resulta obligado establecer, por tanto, como primera premisa que el principal propósito de la agroindustria azucarera es producir azúcar y/o alcohol eficazmente, en la cantidad y con la calidad requerida. De aquí que demos por sentado en nuestras consideraciones que se dispone de caña y de que ésta llega en cantidad suficiente al ingenio, el cual opera establemente cerca de su capacidad potencial, condición obligada para **la eficiencia del proceso y el balance energético de la industria.**

El azúcar sintetiza la caña en el campo y se recupera en el ingenio, pero la caña de azúcar tiene tal capacidad de captar energía que es la capaz de aportar el combustible para su procesamiento y brindar, además, un margen adicional de energía para diferentes propósitos.

A esto se reúnen las peculiaridades de la tecnología de producción de azúcar y/o alcohol, que permiten un empleo integral del potencial energético de su combustible, a través de una adecuada integración entre las corrientes energéticas del proceso.

## 3. DE LOS OBJETIVOS

Consecuentemente el primer objetivo en la política energética azucarera tiene que ser la obtención del máximo de bagazo excedente, después de satisfacer las demandas energéticas del proceso de fabricación de azúcar y alcohol.

Ahora bien, para lograr este objetivo hay dos vías:

I. El incremento de la eficiencia del uso del vapor en el proceso.

II. El incremento de la eficiencia en el sistema de cogeneración

En ambas líneas el primer problema con que nos enfrentamos es la frecuente ausencia de instrumentos de medición que posibiliten una operación efectiva y el conocimiento de los valores reales de consumo, generación, eficiencia, etc. Éstos se determinan muchas veces sobre la base de balances de relativa precisión, cuestión que demanda atención prioritizada.

## **I. DEL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL VAPOR EN EL PROCESO**

La demanda de vapor en el proceso afecta tanto la producción de excedentes de electricidad como la de bagazo. La reducción del consumo de vapor es, consecuentemente, un factor clave en la viabilización técnica e económica de la producción de electricidad excedente a partir de subproductos de la caña.

Para incrementar la eficacia del empleo del vapor para fabricar el azúcar se precisa accionar sobre:

- 1) El esquema energético en el área de fabricación.
- 2) Los parámetros tecnológicos del proceso.

## **II. DEL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE COGENERACIÓN**

La eficiencia del sistema de cogeneración con ciclo a vapor depende directamente de la eficiencia de sus componentes principales: caldera, turbogenerador, transporte del vapor por las tuberías y consumo externo de vapor (proceso). De esta forma, la eficiencia de la caldera, que depende en gran parte de la temperatura de los gases de escape en la chimenea, es un parámetro importante a optimizar buscando la mejora del desempeño del sistema de cogeneración.

Al razonar acerca del incremento de la eficiencia en la generación del vapor en las calderas, hay que actuar tanto en la reducción de las pérdidas de energía en las calderas con los gases de escape y debido a la combustión incompleta, como en una mayor eficacia en la manipulación, almacenamiento y alimentación del combustible, el bagazo.

### **a) Acerca de la reducción de las pérdidas de calor en las calderas**

Las pérdidas más significativas de energía en las calderas se localizan en el calor que escapa por la chimenea con los gases de combustión; sus valores pueden ir desde 11% del valor calórico del combustible en calderas bien eficientes, hasta valores superiores al 35 %.

Para reducir estas pérdidas los elementos más utilizados son el economizador que emplea ese calor residual para elevar la temperatura del agua de alimentación a la caldera y el calentador de aire, que hace lo mismo con el aire requerido para la combustión; son instalaciones sencillas, conocidas y de fácil fabricación. Así, el aumento de la eficiencia en las calderas se consigue, principalmente, a través del

aumento de las superficies de intercambio de calor en economizadores y calentadores de aire. Esto supone, además de un costo adicional, cambios en la potencia necesaria de los ventiladores de tiro forzado e inducido.

Es aceptado que es posible elevar un punto en eficiencia de la caldera por cada 14 °C que se reduzca la temperatura de los gases de salida; de aquí que reducir la temperatura de 280-300 °C a 180-220 °C significará incrementar la eficiencia de generación en 15 unidades [2]. La temperatura de los gases de escape en calderas modernas fabricadas en Brasil está en el rango 170 - 180 °C. Un análisis técnico-económico de la temperatura óptima de los gases de escape en calderas de sistemas de cogeneración para la venta de electricidad excedente mostró la viabilidad de reducir esta temperatura hasta 130-140 °C. Este estudio consideró los costos reales de la instalación de superficies adicionales de recuperación de calor (economizadores y calentadores de aire) y de las tarifas de comercialización de la electricidad excedente.

La combustión incompleta resulta el otro elemento de consideración en la pérdida de eficiencia de las calderas. Factores importantes aquí son la operación con un exceso de aire, adecuado al sistema de combustión, humedad y granulometría del bagazo, además de la distribución adecuada entre el aire primario y secundario. El potencial de aumento de la eficiencia de las calderas está en el rango de 2-4 %. La industria azucarera de caña es la única que emplea un combustible sólido, de composición heterogénea, que cambia sus características a lo largo de la zafra.

La dirección de la acción en este fin está en reducir la cantidad de aire en exceso necesario para la combustión.

Se ha comprobado que por cada unidad que se eleve la eficiencia de la caldera se alcanza una economía de 1.5 unidades de por ciento de bagazo sobrante; así cuantificando el potencial que significa el incremento de la eficiencia en la generación de vapor, vale decir que, *si la eficiencia total de generación de vapor de los ingenios se elevara tan solo en 10 unidades, sería posible disponer de un 15 % más de bagazo sobrante.*

## **b) Del secado del bagazo**

Como señalamos, el secado del bagazo constituye un importante elemento adicional en la búsqueda de mayores volúmenes de bagazo sobrante.

En Cuba ya existen, comprobados en la práctica e inclusive comercializados en otros países, dos sistemas de secado del bagazo integral, tal cual sale del molino, uno neumático y otro rotatorio, que utilizan ambos el calor sensible de los gases de escape de las calderas, reduciendo así, aún más, las pérdidas por esa vía. Sin embargo, es necesario comentar que el secado de bagazo está en contradicción con las tentativas de aumentar la eficiencia de las calderas mediante la reducción de la temperatura de los gases de escape. Hay un punto de inflexión en que una de estas decisiones tecnológicas excluye la otra. Por otro lado la quema de bagazo con humedad inferior a 35 % en calderas diseñadas para bagazo húmedo provoca una escorificación intensa de la ceniza en los hornos y la formación de aglomeraciones vitrificadas.

### **c) De la eficiencia de cogeneración.**

El segundo objetivo en la política energética azucarera es lograr generar el máximo de electricidad produciendo el vapor necesario para el proceso, a fin de alcanzar la plena satisfacción de las necesidades de electricidad de la agroindustria y aportar los excedentes de electricidad al sistema eléctrico.

Esto es posible en razón de que las 4 500 Kcal/kg de azúcar que consume un ingenio productor de azúcar de caña, entre 2 600 y 2 800 Kcal se requieren como energía calorífica en el proceso y solo 360-400 Kcal se necesitan como energía mecánica. De aquí la factibilidad de **cogenerar**.

La eficacia de esta operación radica en que por el turbogenerador pasa el vapor necesario para la fabricación reduciendo su temperatura y presión hasta los niveles requeridos para el proceso, al tiempo que transforma parte de su energía interna en energía mecánica de rotación de la turbina y posteriormente en electricidad,

Al abordar este tópico surge como cuestión obligada lo referido a la presión más apropiada de generación.

No hay dudas que al generar con vapor de mayor presión se obtiene una eficiencia de conversión superior, como consecuencia de la disponibilidad de un mayor salto entálpico del vapor en la turbina; sin embargo, en esta consideración tienen obligatoriamente que intervenir factores de orden no solo termodinámicos, sino también económicos y de factibilidad operacional. Durante decenas de años la presión utilizada en las calderas no sobre pasaba de 1,0 MPa, incrementándose posteriormente para un valor generalizado de 2,0 MPa. Esto permitía obtener excedentes de electricidad de 10-14 kWh/tc. A partir de los años 80, con la modificación de la legislación del sistema eléctrico en varios países y la aparición de la figura del generador independiente, aumentó el interés por la venta de excedentes, que significa un aumento de las ganancias del central de alrededor de 15 %. Esto llevó a una “carrera” por el aumento de los parámetros del vapor hasta 4,0 y 6,0 MPa, hoy valores comunes en centrales modernos, inclusive valores de 8,0 y 12,0 MPa, que comienzan a ser utilizados. Esto ha permitido conseguir, ya en la década de los 90, índices de electricidad excedente de hasta 90 kWh/tc, para valores promedios en el mundo de 50 kWh/tc [8]. Estudios de evaluación termodinámica y económica de casos reales realizados por Lora et al, [3] y Palacio et al. [5] muestran que para las condiciones brasileñas las presiones de mayor viabilidad corresponden a 6,0 MPa y para el caso de destilerías autónomas de gran capacidad es de 8,0 MPa [7]. La práctica actual ha demostrado la factibilidad técnica del uso de altos parámetros en fábricas de azúcar y alcohol. Un problema todavía por resolver es el del combustible para la operación de estos sistemas en el periodo “entre zafras” La paja de caña, la leña de eucalipto y el gas natural, han sido evaluados como posibles opciones.

Veamos como se comporta la eficacia de generación eléctrica para diferentes presiones del vapor:

#### **Estudio de caso de repotenciación de un sistema de cogeneración**

El presente esquema de una usina sucroalcoholera con una capacidad de molienda de 1000 tc/h y cuatro alternativas de repotenciación son simuladas utilizando el software Gate-Cycle (Figura 1). Los principales datos de la usina son presentados en la Tabla 1. Las alternativas de repotenciación son consideradas con diferentes parámetros de

generación de vapor (6,3 MPa/480 °C y 8,2 MPa/520 °C).

Una reducción en el consumo de vapor en el proceso de 540 hasta 480 kg/tc fue también tomada en consideración en dos de las alternativas evaluadas. Los escenarios evaluados fueron llamados de B1, B2, C1 e C2 (Tabla 2) [3]:

Con base en los datos de la Tabla 1 y de la simulación de las diferentes variantes esquemáticas en el Gate-Cycle fue calculado el índice de generación de electricidad excedente para cada uno de los estudios de caso considerados. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.

Los resultados muestran que el incremento en los parámetros de vapor en el proceso de cogeneración tiene un impacto mayor en la generación de excedentes eléctricos de la planta que la reducción del consumo de vapor, sin embargo, se observa que solamente será realizado un aprovechamiento máximo de la energía contenida en la caña de azúcar en la medida en que el aumento en los parámetros de vapor del sistema de cogeneración sea realizado junto con una reducción en el consumo energético del proceso de producción.

Una vez observados los beneficios energéticos obtenidos a través de los aspectos anteriormente mencionados, restan algunas consideraciones sobre algunos beneficios adicionales provenientes de la electrificación que indirectamente contribuye con la mejora de la eficiencia global del sistema de cogeneración de un ingenio [1]:

- (i) El empleo de accionamientos eléctricos en substitución a las turbinas promueve la reducción de pérdidas de energía por radiación en las tuberías de vapor entre la casa de fuerza y las turbinas, pues estas tuberías dejan de existir; (ii) Las variaciones de velocidad y carga de las turbinas que provocan alteraciones en las condiciones del vapor de escape, que a su vez puede influenciar la operación de los equipos conectados a continuación, como evaporadores y columnas de destilación, dejan de existir con la aplicación de accionamientos eléctricos.

Es preciso señalar que la popularidad reciente de la electrificación de las molineras es consecuencia del paso a altos parámetros de vapor que permite disponer de cantidades significativas de electricidad, con alta eficiencia. Sin altos parámetros del vapor la electrificación de las molineras no presenta una viabilidad económica.

#### **4. DE LAS OTRAS OPCIONES Y LAS OTRAS FUENTES**

##### **a) Los residuos de la cosecha**

Constituyen también un potencial apreciable, la utilización de los residuos de la cosecha cañera –RAC, que rigurosamente constituyen las hojas y la paja de la caña. En lo adelante nos referiremos a estos residuos apenas como paja.

El volumen de este material está en el entorno de los 10-14 toneladas por hectárea o 140 Kg. por tonelada de caña (base seca). Aquí es necesario llamar la atención sobre dos cuestiones: la recolección de la paja y su transporte hasta los ingenios está asociado a un costo adicional. Lora resume los resultados de varios proyectos a escala real, que identificaron valores del costo de la paja a la entrada del ingenio [4]. Otra cuestión a considerar es la fracción utilizable de la paja, pues en dependencia del tipo de suelo, es necesario dejar una cierta cantidad de este residuo en el campo para la conservación de la humedad del suelo. Un valor comúnmente mencionado de este

indicador (en estudios del CTC, Cenicaña y de la UNICA está en el 50%, sin embargo, se requieren investigaciones más rigurosas y valores conservadores estarían en el rango 30-50 %).

El hecho de la paja no tener un costo cero (la recolección, el transporte, etc., deben ser valorados), como erróneamente se le atribuye al bagazo, hace necesario pensar en el uso de este residuo apenas en instalaciones con altos parámetros, a fin de que la eficiencia del sistema permita alcanzar la viabilidad económica de su utilización.

Infelizmente todavía el uso de la paja como combustible adicional en los ingenios no es una práctica difundida. Vale la pena destacar, como única experiencia a escala industrial, de varios años de duración el uso extensivo de la paja en el ingenio EQUIPAV en Brasil. Esta estrategia estuvo precedida por una repotenciación total del sistema de cogeneración. El ingenio Equipav, localizado en la ciudad de Promissão, en el Estado de Sao Paulo, Brasil y perteneciente al Grupo hindú Renuka, tiene una potencia instalada de 135 MW [6].

En este ingenio el 50% de la paja se recolecta mecánicamente y es trasladada al ingenio, donde se prepara para ser alimentada en las calderas junto con el bagazo. La generación anual del ingenio Equipav es de  $620 \times 10^3$  MWh, de los cuales se entrega a la red de  $470 \times 10^3$  MWh.

El proyecto de incremento de la generación de electricidad en el ingenio Equipav se realizó en dos Fases.

**Fase 1** De cero electricidad excedente a 58 kWh/tcm, reducción del consumo de vapor de 530-470 kg /tcm, hasta 430-450 kg/tcm, intercambiadores regenerativos jugo/jugo y jugo/vinazas, aumento de la presión de generación desde 2,1 a 6,5 MPa, más instalación de una turbina de condensación.

**Fase 2** Generación con paja de caña todo el año, logrando un índice de 95 kWh/tcm.

En Brasil otras fábricas han seguido ese camino, y en el 2011 el ranking de cogeneración incluía además: Rio Claro (ETH)- 130 MW, Noroeste Paulista (Noble Group, 98 MW), Vale do Rosario (LDC SEV) 97 MW Angélica Agroenergía (Adecoagro)- 96 MW [10].

Sin embargo, de los 405 ingenios brasileños, apenas 48 venden excedentes de electricidad al sistema [9]. Prestamos blandos, posibilidades de conexión e incentivos no han podido vencer el conservadurismo del Sector ante el desafío y el riesgo de un nuevo negocio de venta de electricidad.

## **b) El Biogás**

Los residuos líquidos de los ingenios pueden aportar  $1 \text{ m}^3$  de gas por cada tonelada de caña molida. Igualmente, los residuales de las destilerías (los mostos o vinazas) y los de la producción de torula, resultan también fuentes de biogás.

## **c) Las Vinazas**

La producción de etanol por vía fermentativa produce un residuo de alto poder contaminante por su contenido de materia orgánica y cationes (Potasio principalmente) en cantidades que varían entre 11 y 14 litros por litro de etanol. Aunque su destino principal actualmente es la fertirrigación de los campos, existen opciones de su

aprovechamiento energético por la vía de la digestión anaeróbica y la concentración e incineración han sido planteadas y evaluadas [11,12].

#### **d) Sistemas integrados de gasificación de la biomasa cañera acoplados a ciclos combinados (Sistemas BIG/CC).**

La gasificación de la biomasa permite incorporar al esquema térmico del central azucarero las turbinas a gas. Este esquema prevé la operando en ciclo combinado con el aprovechamiento de la energía de los gases de escape de la turbina a gas, a 600 °C, en una caldera de recuperación que acciona un ciclo a vapor convencional. El índice de generación excedente podría alcanzar un valor de 220-380 kWh/tc. Un sencillo balance de energía nos muestra que este esquema genera mucho menos vapor que el convencional y obligaría a reducciones substanciales del consumo de vapor en proceso de hasta 350-400 kg/tcm. Otras dificultades están en el insuficiente desarrollo de la tecnología de gasificación y limpieza del gas resultante, así como en el alto costo de los equipos. La ISSCT, a través del ISBUC – International Sugarcane Biomass Utilization Consortium y el Gobierno brasileño han comenzado a trabajar en dos proyectos independientes para el desarrollo de la tecnología de gasificación del bagazo y la paja. La utilización del 50% de la paja de la caña permitiría alcanzar índices de generación de electricidad excedente de 139,7 hasta 153 kWh/tcm, con parámetros de vapor de 6,5 MPa y 480 °C, con consumos específicos de vapor en el proceso entre 500 y 350 kg/tcm [14].

#### **e) Biocombustibles partir de residuos lignocelulósicos**

El bagazo y la paja excedente podrían también constituir materias primas para la producción de biocombustibles por la ruta bioquímica (hidrólisis enzimática + fermentación) y la ruta termoquímica (gasificación + síntesis) [13].

Las tecnologías de ambas rutas, todavía en etapa de planta piloto, permitirían producir una gran variedad de biocombustibles: etanol, metanol, butanol, dimetil-eter, entre otros.

En el 2015-2020 deben comenzar a operar las primeras plantas comerciales en el mundo.

Sin dudas, en algún momento se planteará la cuestión de decidir si empleamos estos residuos lignocelulósicos para producir energía eléctrica ó biocombustibles.

Es evidente que si bien la agroindustria azucarera constituye factor de notable peso en el desarrollo y consolidación de una sólida estructura energética en muchos países, la dimensión de su aporte dependerá de una estrategia acertada que asegure la plena expresión de su potencial.

Tal es el reto.



## 5. CONCLUSIONES

La implementación de la estrategia energética basada en:

- I. El incremento de la eficiencia del uso del vapor en el proceso.
- II. El incremento de la eficiencia en el sistema de cogeneración.

Es posible lograr los siguientes resultados:

- Los aumentos en el grado de aprovechamiento energético de la caña de azúcar en un ingenio azucarero, obtenidos mediante el aumento de los parámetros del vapor, son mayores que los que pueden ser obtenidos por mejoramiento en la eficiencia del proceso. Sin embargo, no es posible apenas el aumento en los parámetros con el objeto de maximizar en los excedentes eléctricos producidos por la planta, sin la reducción en el consumo de vapor en el proceso.
  - Se ha comprobado que por cada unidad que se eleve la eficiencia de la caldera se alcanza una economía de 1.5 unidades porcentuales de bagazo sobrante; así cuantificando el potencial que significa el incremento de la eficiencia en la generación de vapor, vale decir que, si la eficiencia total de generación de vapor de los ingenios se elevara tan solo en 10 unidades, sería posible disponer de un 15 % más de bagazo sobrante.

Adicionalmente, se puede lograr:

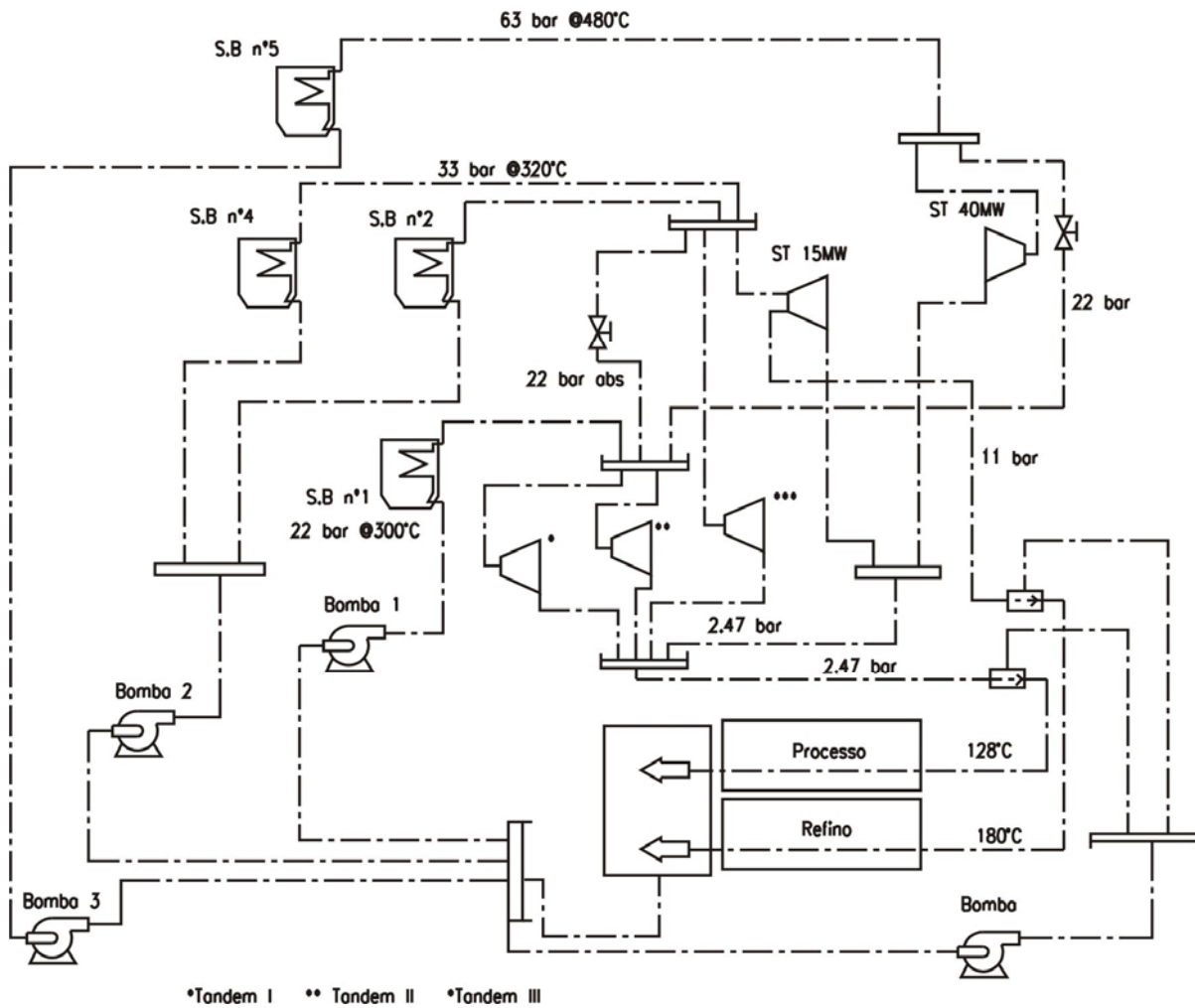
El incremento de los parámetros del vapor, además de inducir un aumento en el índice de electricidad generada y excedente, viabiliza la electrificación de los molinos.

Así, los incrementos en el índice de generación eléctrica permiten alcanzar valores superiores a 90 KWh/tcm, requiriendo reducir el consumo de vapor en el proceso y la sistemática recolección, preparación y uso de la paja.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Pistore, T. T.; Lora, E. E. S. Economic, technical and environmental assessment on cogeneration in the sugar/alcohol industry. *International Sugar Journal*, 108(1292): 441-453, 2006.
- [2] Lora, E. E. S.; Paramonov, A. P.; Teixeira, F. N. Thermal and environmental performance of a modern bagasse cogeneration boiler. *Sugar Industry/Zuckerindustrie*, 129 (12): 881- 886, 2004.
- [3] Lora, E. E. S.; Zampieri, M.; Venturini, O.; Santos, J. J. A sugar mill cogeneration plant repowering alternatives: evaluation through the combination of thermodynamic and economic concepts. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 26, p. 1.064-1.074, 2007.
- [4] Lora, E.E.S., *Controlling air quality in the sugar industry*, Bartens, 2001.
- [5] Palacio, J.C.E., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., Santos, V.A.(2011) An update of cogeneration efficiency and economic indicators using modern commercial technologies, *International Sugar Journal*, V. 113, pp 505-511.
- [6] Cruz, F, *Cogeração Equipav-52,5 MW*, III Simpósio “Alternativas energéticas no Oeste Paulista), Araçatuba, 2001.
- [7] Palacio, J.C.E., Angarita, E.E.Y., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., *Cogeração a partir de resíduos na indústria de biocombustíveis*, En: *Biocombustíveis*. Lora E.E.S. e Venturini, O.J., Editora Interciencia - Em Redação, 2012, 1110 paginas.
- [8] Kinoshita, *Potential of cane energy*, *Proceedings of International Conference on Energy from Sugar Cane; “Progress and Prospects”*, Hilo, Hawaii, 1991.
- [9] Stefano, F, *Do bagaço ao Megawatt*, *Revista Exame*, 16/07/2008.
- [10] Procana, *Anuario da Cana*, 2011.
- [11] Rocha,M.H., Lora E.E.S., Venturini, O. J., Palacio, J.C.E., Santos, J.J.C.S., Moura, A.G.“Use of the Life Cycle Assesment (LCA) for comparison of the environmental performance of four alternatives for the treatment and disposal of bioethanol stillage. *International Sugar Journal*, V. 112, pp, 611-622, 2010
- [12] Salomon, K.R., Lora, E.E.S., Rocha,M.H., Almazán, O., *Cost calculations for biogas from vinasses biodigestion*. *Zuckerindustrie/ Sugar Industry*, v.136, pp 217-223, 2011
- [13] Obando, D.S., Gualdrom, M.A., Reno, M.L.G., Lora, E.E.S., *Techno economic indicators for the thermochemical and biochemical routes for biofuels production using sugarcane bagasse as feedstock*. *Zuckerindustrie/ Sugar Industry*, v. 135, pp. 601-606, 2010

[14] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2005. Estudo sobre as possibilidades e impactos de produção de grandes quantidades de etanol visando a substituição parcial de gasolina no mundo, Fase 1, Nipe / Unicamp.



**Fig.1.** Esquema de la planta de producción de azúcar simulada en el software Gate-Cycle. (Esquema actual-caso de referencia)

**Tabla 1.** Principales parámetros del estudio de caso analizado

<b>Datos de Energía y Producción</b>	
Producción de etanol [m <sup>3</sup> ]	112.000
Producción de azúcar [50 kg bags]	6.000.000
Capacidad de molienda [tc/h]	1000
Días zafra / Factor de utilización [%]	210 / 85
Consumo de vapor en el proceso [kg <sub>v</sub> /tc]	540
Consumo de bagazo [t/h]	240
PCI del bagazo [kJ/kg.K]	7500
Humedad del bagazo [%]	51
Porcentaje de fibra del bagazo	28,00
Potencia instalada [MW]	55,00
Consumo de energía eléctrica [kWh/tc]	13,00
Consumo de energía mecánica [kWh/tc]	17,00
Electricidad excedente [MW]	30,00
<b>Molinos</b>	
<b>Tandem 1 e 2 – Turbinas de simple etapa</b>	
Presión del vapor de entrada [MPa]	2,2
Temperatura del vapor de entrada [°C]	300
Presión del vapor de escape [kPa]	247
Eficiencia isentrópica [%]	45,0
<b>Tandem 3 – Turbina de múltiples etapas</b>	
Presión del vapor de entrada [MPa]	3,3
Temperatura del vapor de entrada [°C]	320
Presión del vapor de escape [kPa]	247
Eficiencia isentrópica [%]	60,0

**Tabla 2** Caso de referencia y los cuatro escenarios de repotenciación propuestos utilizando turbinas de contrapresión (BPST) y turbinas de extracción/condensación (CEST)

<b>Equipos y parámetros</b>	<b>Caso de referencia</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
Caldera: 2,2 MPa @ 300°C	X				
Caldera: 3,3 MPa @ 320°C	X				
Caldera: 6,3 MPa @ 480°C	X	X	X		
Caldera: 8,2 MPa @ 520°C				X	X
BPST Contrapresión 40 MW	X				
BPST Contrapresión 15 MW	X				
CEST Extracción-Condensación 100 MW		X	X	X	X
Consumo de vapor en el proceso 540 kg <sub>v</sub> /tc	X	X		X	
Consumo de vapor en el proceso 480 kg <sub>v</sub> /tc			X		X

**Tabla 3** Índices de generación de electricidad excedente

<b>Escenario</b>	<b>I<sub>g.exced</sub>, kWh/tc</b>
<b>Actual (Caso de referencia)</b>	<b>30,00</b>
B1	71,81
B2	73,81
C1	83,61
C2	85,60

**Autores:**

**Dr. Oscar Almazán del Olmo**

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar  
Cuba

[oscar.almazan@icidca.edu.cu](mailto:oscar.almazan@icidca.edu.cu) / [almazandelolmooscar@yahoo.com](mailto:almazandelolmooscar@yahoo.com)

**Dr. Alfredo Torres Fernández**

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar  
Cuba

[alfredo.torres@icidca.edu.cu](mailto:alfredo.torres@icidca.edu.cu)

**Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Universidade Federal de Itajubá  
Brasil

[electo@unifei.edu.br](mailto:electo@unifei.edu.br)

**Dr. José Carlos Escobar Palacio**

Universidade Federal de Itajubá  
Brasil

[jocesobar@unifei.edu.br](mailto:jocesobar@unifei.edu.br)

*Presentado: 12 de noviembre de 2012  
Aprobado para publicación: 16 de enero de 2013*