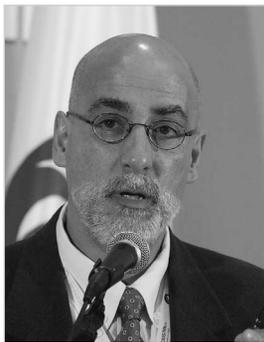


Plantas de cogeneración con caña de azúcar

Sugarcane-based cogeneration plants

Autores



**Silvio de Oliveira Jr. y
Luiz Felipe Pellegrini**

Departamento de
Ingeniería Mecánica
Escuela Politécnica, Universidad de
São Paulo, São Paulo (Brasil)
luiz.pellegrini@poli.usp.br,
silvio.oliveira@poli.usp.br

Palabras clave

Caña de azúcar, generación de
energía, cogeneración, exergía

Sugar cane, generation
of energy, cogeneration, exergy

Resumen

En los últimos 500 años la industria azucarera de Brasil ha evolucionado: pasó de la simple producción de azúcar a convertirse en una empresa de producción de energía (azúcar, alcohol y electricidad). Para mejorar los procesos de conversión de energía dentro del ingenio se desarrollaron diferentes caminos tecnológicos. Esta transformación llevó a los ingenios, en primer lugar, a llegar a ser autosuficientes en energía, y luego, a vender electricidad a la red. Los ingenieros diseñaron sistemas de generación típicos, utilizando bagazo para producir el vapor y la electricidad requeridos para los procesos de producción de azúcar y alcohol. El ingenio es hoy una planta de cogeneración que utiliza caña para producir azúcar, alcohol y electricidad y, además, da origen a muchos subproductos (desechos, vinazas, fibra, torta, etc.), que, en la mayoría de los casos se eliminan o se usan en forma ineficiente. Este documento presenta las tecnologías que emplean actualmente los ingenios azucareros y las compara con las nuevas que utilizan en forma más racional tanto las fuentes de energía como los subproductos de los procesos. El objetivo de este conjunto de técnicas es convertir subproductos de bajo valor en nuevos productos con valor agregado. Las más conocidas son: ciclos de vapor más eficientes (como sistemas de alta presión y presión supercrítica de sistemas de compresión de vapor) y ciclos combinados de biomasa basados en gasificación. Adicionalmente, se aborda el tema de la renovabilidad de los procesos con base en un índice de exergía de renovabilidad.

Abstract

Over the last 500 years, the Brazilian sugarcane industry has evolved from a single product supplier (sugar producer) to an energy production enterprise (sugar, alcohol and electricity). Different technological paths were developed in order to improve the energy conversion processes inside the mill. Those improvements led mills to, first,





become self-sufficient in energy, and then, sell electricity to the grid. The engineers designed typical steam-based cogeneration systems using bagasse to produce the steam and electricity required by the sugar and alcohol production processes. Today, the sugar mill is a polygeneration plant that uses sugarcane to produce sugar, alcohol and electricity and, additionally, generates many by-products (wastes, vinasse, fiber, cakes, etc), which in most cases are discarded or used inefficiently. This paper presents the technologies currently used by sugar mills, and compares them with the new ones that use energy sources and process by-products in a more rational manner. The purpose of these technologies is to convert these low-value by-products into new value-added ones. Most notable among these technologies are: more efficient steam cycles (like high pressure systems and supercritical pressure steam systems) and combined biomass cycles based on gasification. Furthermore, it addresses the renewability of processes based on an exergy index of renewability



Introducción

El cultivo de la caña de azúcar fue la primera actividad agrícola desarrollada en Brasil después de la llegada de los portugueses en el año 1500. La producción de azúcar para exportación fue de gran importancia en el desarrollo de la economía colonial brasileña, principalmente en la zona nororiental, hasta el descubrimiento de oro a finales del siglo XVIII. Durante casi dos siglos Brasil tuvo el monopolio del azúcar. El sistema de producción desarrollado en esa época se basó en el trabajo de esclavos, extensas plantaciones y uso intensivo de recursos naturales. Existía muy poco interés en nuevos procesos y tecnologías.

Mientras tanto, la producción en el Caribe, que comenzó con los holandeses expulsados del noroeste de Brasil en el siglo XVII, pasaba por un proceso de modernización con la introducción de originales variedades de caña, nuevos equipos, utilización del bagazo como fuente de energía y la diversificación de la producción. Así, durante el siglo XVIII, la industria del Caribe reemplazó a la del Brasil.

A comienzos del siglo XIX, bajo el dominio del Emperador Francés Napoleón I, comenzó la producción de azúcar a partir de la remolacha. Asimismo, durante la Revolución Industrial, la utilización de máquinas de vapor como principales motores de las fábricas de acero (John Steward, 1770), evaporadores de múltiple efecto (Norbert Rillieux, 1845), tachos de vacío (Edward Charles Howard, 1813) y las centrifugadoras para

separar los cristales de azúcar de la melaza (Penzoldt, 1837) le permitieron a esta industria, tanto de caña como de remolacha, llegar a niveles tecnológicos y de eficiencia mucho más altos que los de Brasil.

Igualmente, la abolición de la esclavitud en 1888 puso fin a los sistemas de producción de caña de azúcar implementados por casi cuatro siglos. Al mismo tiempo, el cultivo de la caña recobró su importancia como una actividad económica en São Paulo, al migrar de la zona costera a los fértiles suelos del interior.

A medida que aparecían nuevos ingenios y diversas regiones productoras, los ingenios azucareros del Brasil se volvían cada vez menos competitivos. Finalmente, la industria de ese país pasó por un proceso de modernización para competir con otros países productores. Por consiguiente, aparecieron los primeros ingenios operados a base de vapor y se comenzó a utilizar el bagazo como fuente de energía. Sin embargo, los esfuerzos hechos por los productores no fueron suficientes y las exportaciones del producto siguieron disminuyendo.

El comienzo de la Primera Guerra Mundial cambió el escenario: la producción europea de azúcar de remolacha fue destruida y originó un incremento en los precios internacionales que estimuló nuevas inversiones en la industria del país suramericano.

La rápida expansión de la industria azucarera, principalmente en el noroeste y suroeste de Brasil y la crisis

de Wall Street en 1929, llevaron a la posibilidad de un exceso de oferta. Con el fin de controlar la producción, el gobierno carioca creó el Instituto de Azúcar y Alcohol (Instituto do Açúcar e do Álcool – IAA), responsable de los volúmenes de producción lo mismo que de la cantidad de caña de azúcar que debía ser procesada en cada ingenio.

Durante ese período apareció el etanol con dos objetivos principales: regular la producción de azúcar y reducir la dependencia externa del petróleo. En las siguientes décadas, el etanol fue visto únicamente como un subproducto de la producción de azúcar, que además estuvo marcada por disputas entre los industriales por cuotas de producción más altas.

Debido a la crisis petrolera de los años 70 se inició el Programa Nacional de Alcohol (Programa Nacional do Álcool – Pro-álcool) para reducir la dependencia externa de fuentes de energía y el mantenimiento del crecimiento económico. El programa tuvo un gran impacto en la producción de etanol, que se incrementó en más del 200% entre 1970 y 1989. A finales de la década de los 80, los precios del petróleo se recuperaron, lo que afectó la competitividad del etanol. Asimismo, el gran aumento en la producción de vehículos que consumen etanol creó una situación donde la demanda por etanol era más alta que la oferta, lo que condujo a una crisis de suministro.

El retiro gradual del Estado durante la primera mitad de la década de los 90 expuso al sector azucarero del Brasil a un nuevo ambiente de mercado: dejó de establecer precios y cuotas de producción y las empresas se enfrentaron a un ambiente competitivo donde las más eficientes obtendrían las mayores utilidades. Estas compañías comenzaron a buscar nuevas estrategias para diferenciar sus productos.

Con esta *revolución* se profesionalizaron los sistemas administrativos y se consolidó el sector en grandes grupos económicos dueños de muchas instalaciones industriales: una de las características históricas de la industria azucarera de Brasil es la gran cantidad de productores industriales y un número aún mayor de proveedores de caña de azúcar. En un mercado desregulado, los pequeños productores no pueden competir con los grandes, por lo que se han presentado muchos procesos de fusión y adquisición desde el año 2000.

Igualmente, el nuevo escenario económico brasileño y la perspectiva de un desarrollo del mercado mundial de etanol permitieron la inversión extranjera en el sector, que dio como resultado un crecimiento promedio del 10% en la cantidad de caña de azúcar cosechada en el último quinquenio. La crisis económica actual ha causado muchas dificultades a los productores debido a los bajos precios y a la demora en el desarrollo de un mercado internacional de etanol y al alto grado de la deuda en el sector (en relación con inversiones recientes).

No es posible prevenir los resultados de la crisis en esta industria. Sin embargo, los efectos de la desregulación serán irreversibles y el sector se consolidará en un número de grupos capitalizados mucho más pequeño que el que existe actualmente. Además, todos los nuevos proyectos de construcción o renovación de ingenios están evaluando la generación de energía eléctrica para vender a la red nacional como una estrategia de diversificación de productos.

En el período 2008/09 se procesaron 571 millones de toneladas de caña en Brasil, que produjeron 32,1 millones de toneladas de azúcar y 26,6 millones de m³ de etanol. La región Centro-Sur es responsable del 88% de la producción nacional (502 millones de toneladas de caña), con 27,1 millones de toneladas de azúcar y 24,3 millones de m³ de etanol. Asimismo, tiene el rendimiento más alto de caña por área cultivada (84.4 t/ha). Companhia Nacional de Abastecimento– Conab (2008)

La comercialización de la energía eléctrica sobrante generada en el ingenio no es nueva (hay ingenios que la han estado comercializando desde finales de la década de los 80). Pero, debido al bajo costo de la energía eléctrica en Brasil, no es rentable para los ingenios invertir en sistemas de generación eléctrica más eficientes, aún con los incentivos ofrecidos por el Gobierno después de la crisis eléctrica de 2001. La participación de la caña de azúcar y otros tipos de biomasa en la matriz eléctrica es todavía muy marginal: menos del 4%. Ministério das Minas e Energia, 2008.

En 2008, según la EPE (Empresa de Planejamento Energético, 2007). en la primera venta pública de energía de biomasa se contrató un suministro de 2.379 MW (entre 2010 y 2011), principalmente a partir de bagazo de caña (2% de la capacidad instalada en Brasil).



Se espera un suministro de más de 7.000 MW. Empresa de Planeamiento Energético (epe), 2007. Igualmente, en la última venta pública de energía, únicamente el 1% de los 3.125 MW contratados fueron de biomasa. Empresa de Planeamiento Energético (epe), 2007.. Los dueños de la caña de azúcar creen que los bajos precios de venta de electricidad se deben a que la oferta es pequeña.

Adicionalmente, el desarrollo de etanol celulósico, plásticos biodegradables y otros productos pueden convertir los ingenios azucareros convencionales en refinerías a base de caña de azúcar.

Las cifras indican que la industria azucarera de Brasil ha evolucionado de una industria de un solo producto en el siglo XVI a una industria de cogeneración, o como prefieren los productores, una industria energética del siglo XXI.

Este documento presenta una el panorama del uso de caña de azúcar como fuente de energía, resalta todos los procesos de conversión de energía involucrados en la conversión de energía solar en azúcar, etanol y electricidad, su impacto ambiental así como una metodología basada en un análisis exergético para evaluar las diferentes configuraciones para procesos industriales desde los puntos de vista técnico y económico.

El cultivo de la caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), junto con la remolacha azucarera (Taiz y Zeiger, 2004) es una de las relativamente pocas plantas que almacenan sus carbohidratos en forma de azúcar (sacarosa) en vez de almidón. Además, como una planta tipo C_4 , la caña de azúcar es un fotosintetizador muy eficiente (la eficiencia energética de conversión de radiación solar es de 4,8% (Odum, 1971), porque produce de 80 a 90 t/ha. Como base de comparación, el maíz, otra planta tipo C_4 , tiene una eficiencia energética de conversión de radiación solar de 3,2% (Odum, 1971) y produce de 8 a 9 t/ha en los Estados Unidos (Shapouri, H. *et al.*, 2006) y 3,4 t/ha en Brasil. (Companhia Nacional de Abastecimento – Conab, 2008).

El rendimiento más bajo del maíz se debe al sistema de floración y almacenamiento de carbohidratos, basado en almidón, que consume más energía. Por tanto, hay menos energía disponible para sintetizar la sacarosa

Tabla 1. Composición promedio de la caña de azúcar (Smeets, 2006)

Componente	Fracción de Masa (%)
Agua	65 – 75
Azúcares	11 - 18
Fibra	8 – 14
Sólidos solubles	12 - 23

de fotosíntesis en carbohidratos. La Tabla 1 muestra la composición promedio de la caña de azúcar.

La producción de caña de azúcar en Brasil se divide en dos regiones con dos épocas diferentes de cosecha: Centro-Sur (cosecha de abril a noviembre) y Norte-Nororiente (cosecha de agosto a abril). La zona Centro-Sur aporta casi todo el alcohol (90%) y el azúcar (85%). Vale la pena mencionar que durante el siglo XX hubo un cambio en la producción entre el Nororiente y el Centro-Sur (principalmente en el estado de Sao Paulo).

El cultivo de la caña de azúcar se basa en el sistema de soca o retoño, que significa que después del primer corte la misma planta se siega normalmente cuatro veces al año. Antes de la siembra, el suelo se prepara intensamente con operaciones como subsolado, rastillado y aplicación de fertilizantes minerales. Luego, se hacen los surcos y se aplican fertilizantes fosfatados. Posteriormente, se distribuyen las semillas, se cierran los surcos y se vuelve a hacer una aplicación de fertilizantes y herbicidas. A las plantas se les hace un tratamiento con *torta de filtrado* una o dos veces durante el primer año de cultivo. Después de 12 a 18 meses, la caña está lista para el primer corte (União da Agroindústria Canavieira –Única-, 2006).

En Brasil la cosecha se hace tanto en forma manual como mecánica. En la primera se hacen quemas para eliminar las hojas verdes y matar animales peligrosos; después de quemar las hojas se cortan los tallos que contienen el azúcar. La segunda se utiliza únicamente en campos con pendientes de menos del 12%. Con este sistema no hay necesidad de quemar las hojas, que se pueden dejar en el suelo como fertilizante orgánico (União da Agroindústria Canavieira –Única-, 2006). En el período 2006/07, 37% del área total en la zona Centro-Sur se cosechó en forma mecánica (Camargo, 1990)

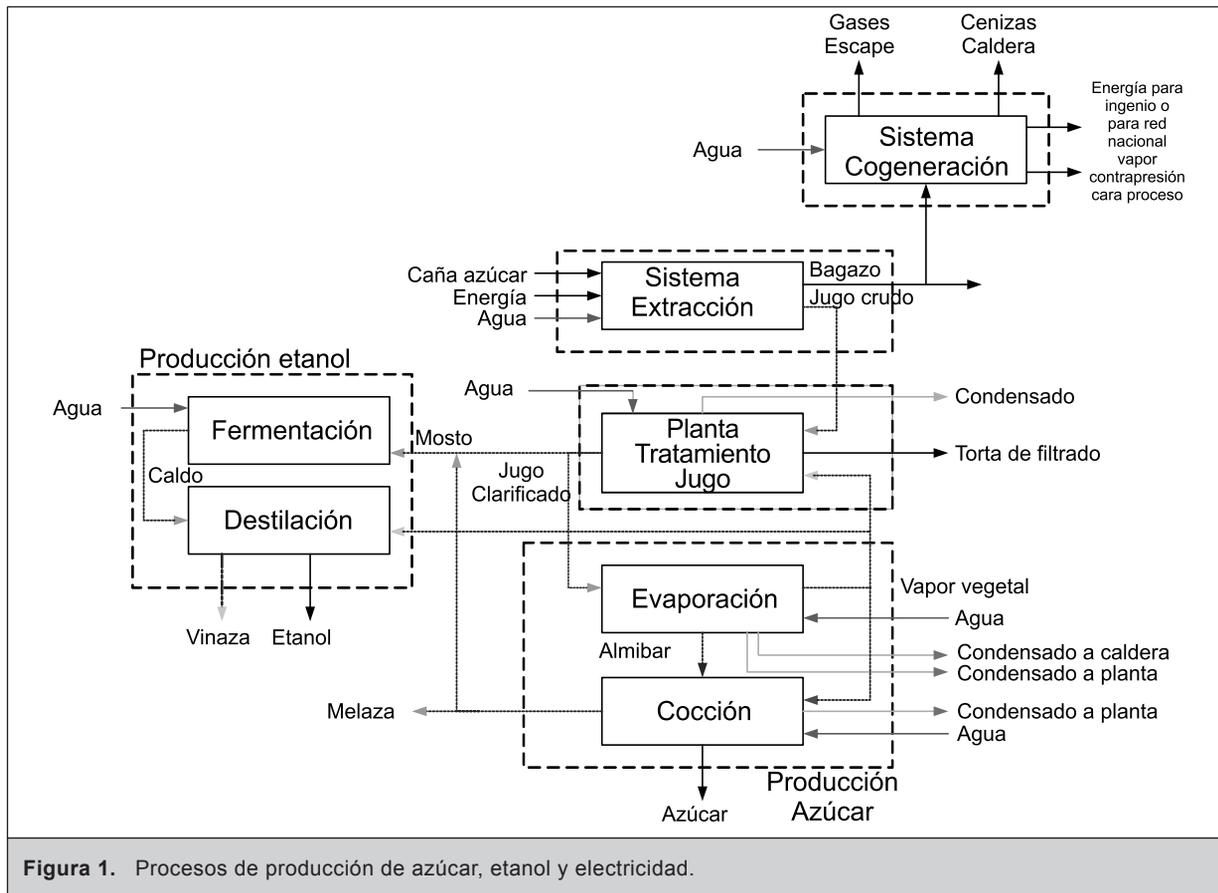


Figura 1. Procesos de producción de azúcar, etanol y electricidad.

El transporte de la caña de azúcar del campo en los ingenios se hace en camiones diésel.

Producción de azúcar, etanol y electricidad

En este documento, las producciones de azúcar, alcohol y electricidad se separaron en cinco volúmenes diferentes de control, como se muestra en la Figura 1.

A continuación se describe cada proceso, con base en Smeets *et al.*, 2006; Rosseto, 2004:

Sistema de extracción

La caña de azúcar está principalmente compuesta de fibra y jugo, donde se disuelve la sacarosa. El propósito de este proceso es recuperar la mayor cantidad de jugo posible y también producir un bagazo con condiciones apropiadas para ser quemado en las calderas. A nivel industrial existen dos procesos de extracción: molienda y difusión. Los dos sistemas requieren de preparación previa de la caña utilizando

cuchillos o trituradores que funcionan con turbinas de vapor.

Tratamiento del jugo

Al jugo que resulta del proceso de extracción se le hace un tratamiento para eliminar impurezas, usando químicos. Durante este proceso, el jugo se calienta con vapor vegetal del evaporador de efecto múltiple.

Producción de azúcar

El jugo clarificado obtenido en la planta de tratamiento pasa por un proceso de concentración, mediante la eliminación de agua. La primera etapa se realiza en un evaporador de múltiple efecto. Con este equipo se transforma el jugo en almíbar y se produce el vapor que se utiliza para calentamiento en otras partes del proceso (planta de tratamiento, cocción y destilería). Debido a la alta viscosidad del almíbar, no es posible concentrarlo más en evaporadores normales; para esto, se utilizan tachos discontinuos al vacío. La evaporación del agua crea una mezcla de cristales



recubiertos con una solución azucarada que se conoce como *pasta cocida*.

La *pasta cocida* se pasa al sector de centrifugación donde se separan los cristales de sacarosa de la solución de azúcar. El proceso se completa lavando el azúcar con agua y vapor mientras está en la canasta. La solución se pasa nuevamente al sistema de cocción para recuperar el azúcar disuelto restante. A partir de este punto, la solución de azúcar se denomina almíbar o melaza y se envía para la producción de etanol o se almacena. El azúcar extraído por las centrifugas tiene un alto nivel de humedad, por lo que se envía a las secadoras antes de ser empacado.

Producción de etanol

El Melle-Boinot, proceso de fermentación por lotes con reutilización de levadura, es el más utilizado en las destilerías de etanol en Brasil. Su característica principal es la recuperación de levaduras mediante la centrifugación del vino fermentado. Parte del jugo clarificado se mezcla con melaza de la producción de azúcar (la mezcla se llama mosto) y se envía a cubas de fermentación. Dentro de las cubas, los azúcares se transforman en etanol. Durante la reacción se libera dióxido de carbono, la solución se calienta más y se forman productos secundarios como alcoholes superiores, glicerol, aldehídos, etcétera.

Se utiliza agua de refrigeración para mantener la solución a 32 °C dentro de las cubas para no afectar la cinética de la fermentación y para evitar la producción excesiva de subproductos. El caldo fermentado se envía a las centrifugas para recuperar la levadura que regresa a los tanques para tratamiento. El caldo sin levadura se lleva a las columnas de destilación. El etanol en el caldo se recupera por destilación, que utiliza los diferentes puntos de ebullición de las sustancias volátiles para separarlas. La operación se realiza en siete columnas a lo largo de cuatro conjuntos (columnas superpuestas): Destilación, Rectificación, Deshidratación, Recuperación de Agente de Deshidratación. A partir de los conjuntos de destilación y rectificación se obtiene alcohol hidratado que se puede deshidratar con ciclo-hexano, monoglicol de etileno, tamices moleculares, que producen alcohol anhidro. El alcohol hidratado, el producto final de los procesos de purificación (destilación) y rectificación es

una mezcla alcohol-agua cercana al nivel de 96°GL. El alcohol anhidro, el producto final del proceso de deshidratación es una mezcla alcohol-agua cercana al nivel de 99,7°GL. El principal subproducto de la producción de etanol es vinaza, compuesta de agua (96% m/m), sólidos minerales y una pequeña cantidad de etanol (0,02°GL).

Sistema de cogeneración

El bagazo generado en el proceso de extracción es enviado a la planta de cogeneración para producir el vapor que se emplea en las turbinas de contrapresión. Estos equipos cubren las demandas electromecánicas del ingenio. El vapor de contrapresión sirve para satisfacer los requisitos térmicos del proceso y su condensado se devuelve a la caldera. Normalmente, la energía electromecánica producida es para uso interno únicamente. Las calderas a base de bagazo producen vapor a 300 °C y 21 bar, para las turbinas de contrapresión. A su vez, el vapor de contrapresión (2,5 bar) se utiliza para satisfacer los requisitos térmicos del proceso, y el condensado se regresa a la caldera.

Normalmente, la energía electromecánica producida es para uso interno únicamente. Sin embargo, algunos ingenios emplean vapor con parámetros más altos (de 42 a 67 bar), y generan un exceso de electricidad que se vende a la red nacional. También existe la tendencia en el sector a reemplazar las viejas calderas por unas nuevas con mayor capacidad (por ejemplo 80 a 120 bar). Estos sistemas se basan en contrapresión (bpst) y turbinas de vapor de condensación-extracción (cest). Aproximadamente del 5 al 7% del bagazo se almacena.

Además de la producción de azúcar, etanol y electricidad, esta industria genera muchos residuos y consume mucha agua en las diferentes partes de los procesos (Figura 1).

Subproductos de la industria de la caña de azúcar

Una característica interesante de la industria de la caña de azúcar es la reutilización de muchos de sus residuos en actividades relacionadas con la cadena agroindustrial, que se consideran subproductos. Como se afirmó anteriormente, el bagazo, un subproducto del proceso

de extracción, se usa como fuente de energía para la planta de cogeneración, evitando los combustibles fósiles. Además, la melaza, un subproducto del azúcar se utiliza en la producción de etanol.

Según Rossetto (Hassuani *et al.*, 2005), la investigación científica junto con los avances tecnológicos y los conceptos de sostenibilidad han convertido el cultivo en una actividad que conserva el suelo, utiliza muy pocos agroquímicos, genera pocos residuos pues estos mismos son importantes para los procesos de producción.

Como subproductos se destacan los siguientes:

- a. Desechos de caña de azúcar: después de la cosecha la parte superior de la caña se deja en el campo como fertilizante orgánico, aunque podría destinarse para alimento de animales o como fuente de energía para producción de electricidad. Las hojas verdes que quedan de la cosecha mecanizada pueden tener los mismos usos del cogollo o parte superior de la caña. Se calcula que por cada tonelada de caña (tc), hay 140 kg de materia seca de desechos. El contenido de humedad de los materiales de la caña de azúcar varía entre 13,5% en las hojas secas y 82,3% en la parte superior de la caña (Braunbeck, 1999). Sin embargo, no existe un estudio concluyente sobre la proporción que debe dejarse en el campo (Braunbeck, 1999; Macedo, 2005).
- b. Torta de filtrado: se genera durante la filtración de los lodos en el tratamiento del jugo. Tiene un alto contenido de fosfatos y materia orgánica que se pueden usar como fertilizantes, acondicionadores del suelo o alimento para animales. Por cada tonelada de caña se producen 35 kg de torta de filtrado.
- c. Vinaza: es un subproducto del proceso de destilación de etanol con alta dbó y dqo. Se emplea como fertilizante debido a su alto contenido de potasio. En áreas donde se queman o se entierran los residuos de cosecha durante la preparación del suelo, el suelo desprotegido queda expuesto al impacto de la lluvia, la primera y más importante etapa en el proceso de erosión por agua (Braunbeck, 1999). Se estima que por cada litro de etanol se producen de 9 a 13 litros de vinaza.

- d. Cenizas de caldera: se forman durante la combustión del bagazo en las calderas; se utilizan como fertilizante potásico. Por cada tonelada de caña se producen de 5 a 6 kg de cenizas en la caldera.
- e. Condensados: provienen del vapor vegetal y sirven para procesos de calentamiento en el tratamiento de jugo, los evaporadores, los tachos de vacío y la destilería. Se pueden usar como agua de imbibición, en el sistema de extracción, para lavar el azúcar de los filtros después del proceso de cocción y en la preparación de soluciones químicas para tratamiento del jugo.
- f. Agua residual: se genera por los procesos de lavado de los equipos. Se puede aplicar como fertilizante.
- g. Agua para el lavado de la caña: tiene un alto contenido de sacarosa, suelo y material vegetal. Normalmente, el agua recircula en un circuito cerrado.

Como se describió anteriormente casi todos los subproductos sirven como fertilizantes. No obstante, existen otros usos que implican una utilización más racional de la energía y de los subproductos: la vinaza, por ejemplo, se puede transformar en biogás por medio de digestión anaeróbica. Por su parte, los desechos de la caña se pueden aprovechar como fuente de energía para la planta de cogeneración e inclusive como materia prima para la producción de etanol, por medio de hidrólisis.

Impactos ambientales relacionados con la industria de la caña de azúcar

A continuación se analiza brevemente el principal impacto ambiental de la industria de la caña de azúcar en el suelo, el agua y el aire, con sustento en diferentes trabajos (União da Agroindústria Canavieira –Única-, 2006; Hassuani *et al.*, 2005; Leme, 2005).

Impacto en el suelo

La erosión es la principal fuente de degradación de las tierras agrícolas. Se sabe que con el cultivo de la caña de azúcar las pérdidas de suelo son pequeñas comparadas con el maíz y la soya (Hassuani *et al.*, 2005; Leme, 2005).



En áreas donde los residuos de cosecha se queman o se entierran durante la preparación del suelo, el suelo desprotegido queda expuesto al impacto de la lluvia, que es la primera y más importante etapa en el proceso de erosión por agua. La cosecha mecanizada deja desechos de caña, mejora la protección contra la erosión y permite el reciclaje de los nutrientes (Hasuani *et al.*, 2005; Braunbeck, 1999).

En relación con la utilización de fertilizantes, el cultivo de la caña de azúcar es único debido al uso intenso de residuos de procesos industriales. Otro beneficio relacionado con esta práctica es la eliminación de los costos derivados de la eliminación de esos desechos (Florentino y Sartori, 2003).

Con respecto al uso de la tierra, el cultivo de la caña de azúcar actualmente ocupa únicamente el 4% del área agrícola total en Brasil (Leme, 2005).

Impacto en el agua

En la última década se ha hecho un gran esfuerzo para disminuir el consumo de agua dulce en la industria azucarera: En 1997, el consumo neto fue de 5 m³/tc. Actualmente, este valor se ha reducido a 1,8 m³/tc, debido al reciclaje del agua en los procesos y el uso de subproductos (por ejemplo, vinazas) en irrigación (Leme, 2005).

Impacto en el aire

La quema de la caña de azúcar produce emisión de partículas e implica un riesgo potencial en cuanto a accidentes relacionados con el humo. Asimismo, la dispersión de metano contribuye a la circulación de gases de efecto invernadero en esta industria. La cosecha mecanizada evita las quemaduras, pero tiene un impacto negativo en el empleo, en razón a que se requieren menos trabajadores.

Por otro lado, el uso de etanol mejora la calidad del aire en las regiones urbanas y también favorece la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La generación de electricidad con el uso de bagazo en sistemas de cogeneración también contribuye a esta disminución. Leme (Florentino y Sartori, 2003), discute la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero para diferentes alternativas de cogeneración disponibles actualmente en los ingenios azucareros.

Análisis exergético del ingenio azucarero

Después de revisar las principales características de la industria de la caña de azúcar, se hace más énfasis ahora en los procesos industriales, considerando los procesos de conversión de energía durante la coproducción de azúcar, alcohol y electricidad.

Los caminos tecnológicos para conversión de caña en azúcar y etanol se conocen desde hace muchos años. Actualmente, los esfuerzos relacionados con la optimización del rendimiento de azúcar y etanol se concentran en el desarrollo de variedades de caña de alto rendimiento de sacarosa por área cultivada y en reducir las pérdidas de sacarosa durante los procesos mediante sistemas modernos de control y mejores técnicas de producción. Asimismo, con relación al desarrollo de variedades, se están aplicando técnicas de optimización para seleccionar variedades de caña que beneficien la producción y los sistemas industriales, reduzcan residuos de cosecha y aumenten la producción final de energía (Pellegrini y Oliveira, 2007). Se debe tener en cuenta que un contenido más alto de sacarosa significa menos fibra (menos bagazo disponible) y viceversa (Tabla 1).

A propósito de los procesos de conversión de energía dentro de los ingenios se pueden citar dos enfoques interrelacionados: reducción de consumo de vapor y mejoramiento del sistema de cogeneración, que permite mayor generación de electricidad.

Para investigar el rendimiento de los diferentes procesos de conversión de energía se desarrolló un modelo global de coproducción de azúcar, alcohol y electricidad (Pellegrini y Oliveira, 2006), por medio del cual se evalúan diferentes configuraciones del sistema de cogeneración, lo mismo que de la red de intercambiadores de calor dentro del ingenio.

Como punto de partida se hizo un análisis exergético para un ingenio azucarero tradicional, con 50% de la caña para producción de azúcar y 50% para producción de etanol, sin generación de energía eléctrica sobrante. Los resultados muestran que la destrucción de exergía dentro del ingenio es de 729 kWh/tc (la exergía de la caña de azúcar es 5.273 kJ/kg ó 1.465 kWh/tc). Además, el exceso de bagazo y vinaza representa 128 kWh/tc y 15 kWh/tc, respectivamente.

Ambos se pueden considerar como pérdida de exergía. Así, el total de las irreversibilidades en el ingenio es de 872 kWh/tc.

La Figura 2 muestra la distribución de la destrucción de exergía entre los procesos, teniendo en cuenta datos de un ingenio típico en Brasil.

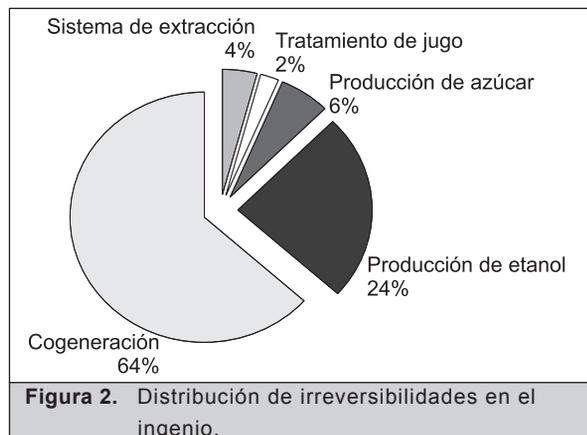
La planta de cogeneración representa más del 60% de las irreversibilidades del ingenio. La producción de etanol ocupa el segundo lugar, seguida por la producción de azúcar.

Por lo tanto, las modificaciones en la planta de servicios tendrían un mayor impacto en la eficiencia general que las modificaciones en otros subsistemas. Sin embargo, debido al alto nivel de interacción entre cada subsistema, se deben evaluar otras modificaciones.

En la planta de cogeneración, las calderas son la principal fuente de las irreversibilidades. Por esta razón existe la posibilidad de un mejor desempeño de estos subsistemas, por ejemplo:

1. Valores más altos de los parámetros de vapor.
2. Mejoras en el horno, porque se reduce el exceso de aire necesario.
3. Mejor distribución de las áreas de transferencia de calor, porque disminuye la temperatura de los gases de escape.
4. Reemplazo de la válvula de reducción por un eyector y merma en la demanda de vapor en el evaporador de efecto múltiple o de la turbina para generar electricidad para la red nacional.

En los ingenios azucareros de Brasil, sin generación de energía eléctrica sobrante para la red nacional,



también es común el uso de válvulas de reducción para satisfacer los requisitos de calor del proceso.

Adicionalmente, se pueden utilizar sistemas de cogeneración más avanzados como por ejemplo ciclos de vapor supercrítico y/o Ciclos Combinados de Gasificación de Biomasa (bigcc, por sus siglas en inglés). No obstante, el uso de estas configuraciones requiere modificaciones en la red de intercambiadores de calor para bajar el consumo de vapor de contrapresión.

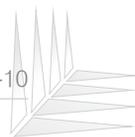
En trabajos anteriores (Ensinas *et al.*, 2008; Avram y Stark, 2004) se ha discutido una mejor integración térmica del evaporador de efecto múltiple para satisfacer los requisitos de calor de la planta de tratamiento de jugo, cocción y destilería. Con base en esos estudios es posible reducir el consumo de vapor de contrapresión a 390 kg/tc e inclusive a 280 kg/tc.

Las plantas de producción de azúcar de remolacha y las destilerías de etanol de maíz son mucho más eficientes en el uso de energía que los ingenios azucareros porque utilizan combustibles fósiles que tienen que comprar. Hassauni y colaboradores (Braunbeck, 1999) muestran que el consumo actual de vapor de un ingenio azucarero promedio se puede reducir considerablemente, utilizando la tecnología disponible de las plantas de azúcar de remolacha y las destilerías de etanol de maíz. El mismo estudio propone diferentes modificaciones para reducir el consumo de vapor de contrapresión a 280 kg/tc.

Avram y colaboradores (Avram *et al.*, 2004; Wall, 1977) presentaron un diseño conceptual para una planta integrada de cogeneración y producción de azúcar y etanol empleando tecnología de punta. Lograron un consumo de vapor de 305 kg/tc en el proceso, apropiándose de un concepto diferente para la distribución de la destilería y una mejor integración entre el evaporador de efecto múltiple y la red de intercambiadores de calor.

Optimización de los costos exergéticos de producción de azúcar, etanol y electricidad

Esta sección compara alternativas mejoradas para la producción de azúcar, etanol y electricidad, considerando:



1. Mejor integración térmica de los procesos de intercambio de calor
2. Diferentes configuraciones para la planta de cogeneración
 - a. Sistemas Convencionales de Vapor de Contrapresión (bpst, por sus siglas en inglés) (Pellegrini y Oliveira, 2006)
 - b. Sistemas de Vapor Condensación-Extracción (cest, por sus siglas en inglés) (Pellegrini y Oliveira, 2006).
 - c. Sistemas de Vapor Supercrítico (SuSC, por sus siglas en inglés) (Avram y Stark, 2004).
 - d. Ciclos Combinados de Gasificación de Biomasa (BIGCC, por sus siglas en inglés) (Avram y Stark, 2004).

Los sistemas bpst son los más comunes en los ingenios azucareros de Brasil: constan de calderas a base de bagazo y turbinas de vapor de contrapresión. Pueden generar energía eléctrica sobrante para venta únicamente en la cosecha. Casi todo el bagazo producido se consume. Los sistemas cest se pueden emplear para vender electricidad durante todo el año, como una opción para bpst. La turbina de condensación-extracción suministra vapor para el proceso y el vapor sobrante se envía al condensador. En estos sistemas se requiere una reducción en el consumo de vapor; el bagazo se almacena durante la cosecha para utilizarlo en épocas posteriores. Para ambos sistemas, bpst y cest, se utilizaron diferentes temperaturas y presiones: 42 bar/400 °C, 42 bar/450 °C, 67 bar/480 °C, 67 bar/515 °C, 80 bar/520 °C, 100 bar/520 °C y 120 bar/540 °C. Así mismo, la reducción del consumo de vapor se evaluó separadamente del uso de turbinas de compensación a fin de entender el impacto en la producción de azúcar, etanol y electricidad.

La configuración SuSC puede verse como una mejora de los sistemas cest, con parámetros de vapor muy altos e intercambiadores de calor regenerativos para recalentar el agua de alimentación de la caldera. Estas modificaciones mejoran la eficiencia del sistema de vapor. Los sistemas basados en gasificación de biomasa, considerando la posibilidad de usar turbinas a gas, pueden generar electricidad. El bagazo y otros residuos de la caña de azúcar se secan y se envían a

un gasificador, donde se produce gas de bajo valor térmico que sirve como combustible para la turbina. Los gases de escape se envían a un Generador de Vapor de Recuperación de Calor (hrsg, por sus siglas en inglés) que produce vapor sobrecalentado a una turbina de condensación-extracción. En este trabajo se estudió la gasificación tanto atmosférica (bigcc i y ii) como presurizada (bigcc iii).

Mayor información sobre estas configuraciones se puede encontrar en Pellegrini y Oliveira, 2006; Pellegrini *et al.*, 2008.

Comparación exergetica de alternativas

Las Figuras 3 y 4 presentan el costo exergetico para azúcar, etanol y electricidad para todas las configuraciones, lo mismo que la cantidad de energía eléctrica sobrante generada en cada caso.

Es posible mostrar una disminución en el costo exergetico de azúcar y etanol con el uso de sistemas de cogeneración más eficientes, es decir, que generen más energía eléctrica.

La disminución de costos exergeticos de azúcar y etanol para el sistema bpst se alcanza con una reducción de irreversibilidades en el sistema de cogeneración (baja eficiencia en el ciclo de vapor y la cantidad de bagazo sobrante no utilizada en el sistema). En esta forma, las más altas temperaturas y presiones para el vapor producido en la caldera, que implica mayores cantidades de bagazo consumido en el sistema de cogeneración, tienen un efecto positivo en los costos exergeticos de electricidad y vapor de proceso. Esto a su vez conduce a menores costos de producción para

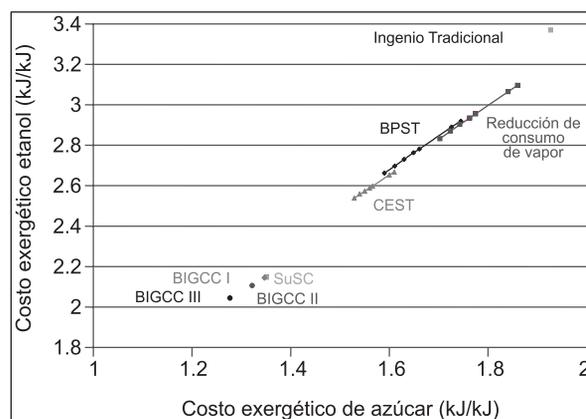
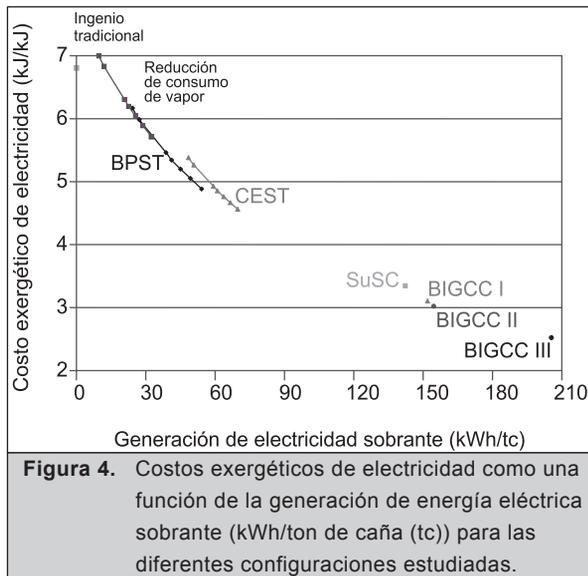


Figura 3. Costos exergeticos de azúcar y etanol para las diferentes configuraciones estudiadas.



azúcar y etanol, aunque la destrucción de exergía en los procesos de producción es la misma que en los ingenios tradicionales.

El menor consumo de vapor atenúa la destrucción de exergía en los procesos de producción de azúcar y etanol con un aumento de la pérdida exergética relacionada con una mayor cantidad de bagazo sobrante. El efecto neto de esta alternativa es costos exergéticos más altos para azúcar y etanol.

Para utilizar el bagazo sobrante se introdujeron los sistemas cest que registran un recorte promedio del 6% en los costos exergéticos de azúcar y etanol, relacionados con un mínimo consumo de vapor de proceso y menores costos exergéticos de electricidad. Esto implica un aumento promedio del 56% en energía eléctrica sobrante y la utilización de todo el bagazo disponible en el sistema de cogeneración. De esta manera, el costo exergético unitario por consumo de bagazo es menor.

De acuerdo con el análisis anterior, se asume que la asignación de costo cero al bagazo sobrante tiene un gran impacto en el costo exergético del vapor de proceso y de la electricidad y, como consecuencia, en los del azúcar y del etanol. Dicho supuesto tiende a aumentar el costo del bagazo consumido en la caldera siempre que existan mayores cantidades de sobrantes. El análisis indica que se debe hacer un uso racional de bagazo en los ingenios azucareros para mejorar el rendimiento y, además, para comparar usos alternativos del bagazo sobrante.

La electrificación de los dispositivos mecánicos representa una reducción promedio del 2% en los costos exergéticos de azúcar y etanol, porque se generande aproximadamente 7 kWh/tc de exceso de electricidad.

Los sistemas avanzados de cogeneración representan las siguientes ventajas: a) menor destrucción de exergía en los procesos de azúcar y etanol, relacionada con una mejor integración térmica; y b) mayor eficiencia bagazo-a-electricidad. Estos reducen, en promedio, 15% de los costos exergéticos, en comparación con los sistemas cest.

Los SuSC y bigcc pueden producir tres veces más electricidad con respecto a las opciones actuales (BSPT y cest). Sin embargo, el primero, contrastado con el segundo, genera 10 kWh/tc menos que los sistemas bigcc atmosféricos, mientras que el sistema presurizado es capaz de producir 30% más de electricidad. La razón de esta diferencia es que los sistemas atmosféricos necesitan un compresor de gas para inyectar el gas producido en la cámara de combustión de la turbina, que requiere casi 50 kWh/tc. En conjunto, los sistemas más avanzados pueden aumentar la eficiencia bagazo-a-electricidad hasta en un 36%.

Aunque SuSC no es competitivo con bigcc presurizado en cuanto a generación de electricidad, la tecnología para implementar plantas SuSC en ingenios azucareros parece estar más cerca a la escala comercial que las plantas bigcc. Pero, los SuSC no son adecuados para pequeñas capacidades instaladas, porque la operación de las primeras etapas de la turbina con pequeños flujos de masa (flujo volumétrico reducido) requiere aspas muy pequeñas, con diseño ineficiente relacionado con fugas entre las diferentes etapas. Las plantas más pequeñas para SuSC tendrían que ser de 280 MW: así los ingenios procesarían cerca de 6,5 millones de toneladas al año. Debido a que en la última cosecha únicamente dos ingenios procesaron más de 6 millones de toneladas, con las plantas SuSC se pueden construir plantas centralizadas cerca a un grupo de ingenios y no dentro de él.

Si se requiere de electricidad durante todo el año, entonces las configuraciones SuSC y bigcc requieren un combustible complementario (desechos de caña de azúcar), porque todo el bagazo sería consumido



durante la molienda. La configuración BPST no es adecuada para generación de electricidad los 365 días y la de cest es capaz de generar utilizando bagazo solamente. No obstante, se deben abordar cuidadosamente los problemas concernientes al almacenamiento del bagazo y de los desechos de caña de azúcar. Para ello se plantea el secado de la biomasa y su posterior conversión en briquetas o pellets, más fáciles de almacenar. En el presente documento no se tratan estos problemas ni sus soluciones.

Renovabilidad de los procesos de conversión de energía

Recientemente se ha hablado mucho sobre el desarrollo sostenible, las emisiones de gases de efecto invernadero, el impacto ambiental y las fuentes de energía renovables. Pero, hasta ahora, el concepto de renovabilidad se ha asociado con balances de masa y energía, sin tener en cuenta la destrucción de exergía que se origina en la conversión de energía.

Como lo han afirmado muchos autores (Szargut 2002; Velásquez *et al.*, 2008), la exergía se origina del contraste entre el sol y el espacio; maneja los flujos de energía y materia en la superficie de la Tierra y se destruye para mantener los ciclos naturales responsables del reciclaje de materiales en la superficie. Una pequeña parte de ella es almacenada como combustible fósil y mineral. El reciclaje toma tiempo y exergía, pero el reciclaje total no es posible debido a la Segunda Ley y también porque la exergía solar no aumenta.

El desarrollo humano actual se basa en el uso de combustibles fósiles a una tasa mayor a la que estos se generan. Debido a que no es posible el reciclaje total, imperativo buscar tecnologías que aprovechen mejor la exergía disponible de todas las fuentes, incluyendo las renovables. Siempre que se discuta la renovabilidad de cualquier producto se deben considerar dos aspectos:

1. Origen de su fuente de energía
2. Eficiencia de los procesos de conversión de energía

Con base en esto, se propone el siguiente índice de exergía de renovabilidad:

$$\lambda = \frac{\sum B_{\text{product}}}{B_{\text{fossil}} + B_{\text{destroyed}} + B_{\text{de-activation}} + \sum B_{\text{by-products/emissions}}} \quad (1)$$

donde:

- B_{product} representa la energía neta asociada a los productos y subproductos.
- B_{fossil} es la exergía no renovable consumida en procesos de producción.
- $B_{\text{destroyed}}$ es la exergía destruida dentro del sistema que castiga la ineficiencia del proceso.
- $B_{\text{de-activation}}$ es la exergía de desactivación para tratamiento de desechos cuando se llevan a condiciones de equilibrio con el medio ambiente. Representa la exergía requerida para pasar los flujos que salen del sistema, considerados como desechos, a condiciones que no afecten el medio ambiente.
- $B_{\text{by-products/emissions}}$ es la exergía de los desechos que no son tratados o desactivados.

Este índice implica que:

- Procesos con $0 \leq \lambda < 1$ son ambientalmente desfavorables.
- Para procesos reversibles interna y externamente con insumos no renovables, $\lambda = 1$.
- Si $\lambda > 1$, el proceso es ambientalmente favorable. Además, el aumento de λ implica que el proceso es ambientalmente sostenible.
- Cuando $\lambda \rightarrow \infty$ significa que el proceso es reversible con insumos renovables y sin generación de desechos.

Si λ es mayor a 1 significa que la exergía del producto podría ser usada para restaurar el ambiente a las condiciones que existían antes del proceso (reciclaje del combustible fósil consumido y generación de entropía), y aún tiene una producción neta de exergía. En este sentido, los ciclos naturales serían responsables únicamente del reciclaje de fuentes naturales, que no causan daño inmediato al medio ambiente, con base en el ciclo de vida humano.

Debido a que λ considera la destrucción de exergía en los procesos, aún si la exergía viene de un recurso renovable, un proceso ineficiente pone en peligro

el desempeño ambiental del sistema. Igualmente, un proceso eficiente con exergía fósil puede tener un desempeño ambiental mejor que los que utilizan fuentes renovables.

La Figura 5 muestra los valores λ para el ingenio como un todo y también para el sistema de cogeneración de las diferentes configuraciones estudiadas.

En cuanto a los costos exergéticos de azúcar y etanol, el índice de exergía de renovabilidad tiene mejores valores para configuraciones más eficientes. Adicionalmente, los sistemas SuSC y bigcc's tienen un valor mayor a 1, lo que indica que las otras configuraciones no se consideran renovables desde el punto de vista de la Segunda Ley.

Comparando los sistemas de cogeneración es interesante ver un mejor desempeño ambiental de los bpst comparados con los cest. Esto es consecuencia de la operación ineficiente de este último como sistema de generación de electricidad. A pesar de ello no debe concluirse que los bpst son mejores que los cest, porque el alto consumo de vapor en los primeros resulta en mayor destrucción de exergía en los procesos de producción de azúcar y etanol, con peor desempeño ambiental para el ingenio como un todo.

Resulta interesante comparar los valores λ de estos sistemas de cogeneración con aquellos de plantas termoeléctricas convencionales, con eficiencias que varían entre 30% (sistemas subcríticos de vapor a base de carbón) y 60% (ciclos combinados a base de gas

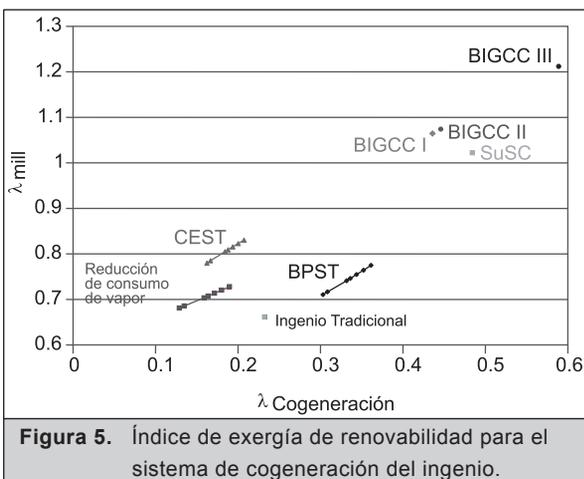


Figura 5. Índice de exergía de renovabilidad para el sistema de cogeneración del ingenio.

natural con hrsg de tres presiones). Si en estas plantas se utiliza combustible fósil únicamente, entonces λ se puede calcular así:

$$\lambda = \frac{W_{\text{net}}}{B_{\text{fossil}} + B_{\text{destroyed}} + \sum B_{\text{by-products/emissions}}} = \frac{\eta_{\text{ex}}}{2 - \eta_{\text{ex}}} \quad (2)$$

En esta forma, los valores λ para plantas termoeléctricas varían entre 0,18 y 0,43. Los sistemas cest tienen un desempeño ambiental similar al de las plantas termoeléctricas con eficiencias menores al 30%, mientras que los bpst son comparables con las plantas con 50% de eficiencia.

En conjunto, se debe optimizar la eficiencia de conversión bagazo-a-electricidad para obtener un mejor desempeño ambiental del ingenio como un todo.

Conclusiones

Se ha demostrado que un mejor desempeño termodinámico del sistema de cogeneración tiene que ver con una disminución en la destrucción de exergía de todos los procesos de conversión de energía y se traduce en una disminución de los costos exergéticos de azúcar y etanol.

Los sistemas convencionales de cogeneración son capaces de generar hasta 80 kWh/tc de energía eléctrica sobrante, dependiendo del consumo de vapor. Igualmente, los sistemas avanzados de cogeneración permiten hasta 200 kWh/tc, lo que representa un potencial de generación de 111 TWh/año ó 25% del consumo de electricidad en Brasil.

Utilizando un índice de exergía de renovabilidad, se ha dicho que una mejor eficiencia de exergía de los sistemas de cogeneración y una mejor integración térmica de los procesos de conversión de energía en el ingenio optimizan el desempeño ambiental de la producción de azúcar, etanol y electricidad.

Finalmente, se ha demostrado que la minimización de la generación de entropía en los procesos de conversión de energía permite un mejor desempeño térmico, económico y ambiental del ingenio, principalmente cuando la operación de cogeneración es más eficiente.



Bibliografía

- Avram, P.; Stark, T. 2004. Integration of Ethanol Production *with a Sugar Factory Producing Maximum Cogeneration*, *International Sugar Journal*, Vol. 106, No. 1263, pp. 126-137
- Avram, P.; Morgenroth, B.; Seemann, F.; Benchmarking. 2004. Concept for an Integrated Sugar, Ethanol and Cogeneration Plant, *Zuckerindustrie*, Vol. 129, No. 12, pp. 875-879.
- Braunbeck, O.; Bauen, A.; Rosillo-Calle, F.; Cortez, L. 1999. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 17, pp. 495-506.
- Camargo, C. A. (coord.). 1990. *Conservation of Energy in the Sugar and Alcohol Industry (Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool)*, Institute of Technological Researches (Instituto de Pesquisas Tecnológicas).
- Companhia Nacional de Abastecimento – Conab 2008. *Third Assessment of the Sugarcane Harvesting*, (available at: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento2008_dez2008.pdf).
- Empresa de Planejamento Energético (EPE). Brasil. 2008. Available at: <http://www.epe.gov.br/>. Accessed in: 22 jun. 2009.
- Ensinas, A.V.; Modesto, M.; Nebra, S.; Serra, L. 2008. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane, *Energy*, Vol. 34, n. 5, pp. 680-688.
- Florentino, H. O.; Sartori, M. M. P. 2003. Game Theory in Sugarcane Crop Residue, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 25, pp. 29-34.
- Hassuani, S. J.; Leal, M. R. L. V.; Carvalho, I. (eds). 2005. *Biomass Power Generation: Sugarcane Bagasse and Trash*, UNDP (United Nations Development Programme), CTC (Centre of Sugarcane Technology – Centro de Tecnologia Canavieira).
- Leme, R. M. 2005. Estimation of atmospheric emissions and water use in the production of electricity with sugarcane residues, *M.Sc. Thesis*, Unicamp Faculty of Mechanical, Campinas.
- Macedo, I. (org.) 2005 *The Energy of Sugarcane (A Energia da Cana-de-Açúcar)*, Union of the Sugarcane Agroindustry – União da Agroindústria Canavieira (Unica).
- Ministério das Minas e Energia (MME), Empresa de Planejamento Energético (EPE). *Balanço Energético Nacional 2008: Ano Base 2007*. EPE, Rio de Janeiro (Brasil).
- Odum, E. P. 1971. *Fundamentals of Ecology*, 3rd edition, W. B. Saunders Company, Philadelphia (Pennsylvania).
- Pellegrini, L. F.; Oliveira Jr.; S. 2006. Exergetic Evaluation of Multiple-Effect Evaporators in Sugarcane Mills, *Proceedings of ECOS 2006*, Aghia Pelagia (Greece). July 12-14, Vol. 1, pp. 569-576.
- Pellegrini, L.F.; Burbano, J.C.; Oliveira Jr.; S. 2008. Supercritical Steam Cycles and Biomass Integrated Gasification Combined Cycles for Sugarcane Mills, *Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Krakow* (Poland). Vol. 2, pp. 649-658.
- Pellegrini, L.F.; Oliveira Jr.; S. 2007. Exergy Efficiency of the Combined Sugar, Ethanol and Electricity Production and its Dependence of the Exergy Optimization of the Utilities Plants, *Proceedings of the 20th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Padova* (Italy). Vol. 1, pp. 819-828.
- Rosseto, R. 2004. The Sugarcane Culture: from Degradation to Conservation (A Cultura da Cana, da Degradação à Conservação), *Visão Agrícola*, Ano 1, Jan-Jun, pp.80-85.
- Shapouri, H.; Duffield, J. A.; Wang, M. 2006. The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update, U.S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. *Agricultural Economic Report* No. 813. Copersucar, 2007 (available at: www.copersucar.com.br/default_ing.asp?Idioma=ing).
- Smeets, E.; Junginger, M.; Faaij, A.; Walter, A.; and Dolzan, P. 2006. Sustainability of Brazilian Bio-ethanol, *Report NWS-E-2006-110*, The Netherlands Agency for Sustainable Development and Innovation.
- Szargut, J. 2002. Anthropogenic and natural exergy losses (exergy balance of the Earth's surface and atmosphere). *Energy*, v. 28, n. 11, p. 1047-1054.
- Taiz, L.; Zeiger, E. 2004. *Plant Physiology (Fisiologia Vegetal)*, 3rd edition, Artmed, Porto Alegre (Rio Grande do Sul). (In Portuguese).
- União da Agroindústria Canavieira (Unica). (2006) *Final Evaluation of the Sugarcane Harvesting 06/07 – Centre-South Region (Avaliação Final da Safra 06/07 – Região Centro-Sul)*. (Available at: http://www.portalunica.com.br/portalunica/files/referencia_palestraseapresentacoes_coletivas-10-Arquivo.pdf).
- Velásquez, H. I.; Pellegrini, L. F.; Oliveira JR.; S. 2008. *Ethanol and Sugar Production Process from Sugarcane: Renewability Evaluation*. In: 12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2008, Belo Horizonte. Proceedings of ENCIT 2008, 2008 (em CD-ROM).
- Wall, G. 1977. *Exergy – a Useful Concept within Resource Accounting*. Report no. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Göteborg. 58 p.