

Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?

Dos casos de estudio

Ing. Francisco Diez Torres e Ing. Norge Garrido Carralero

* *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), La Habana, Cuba.
e-mail: francisco.diez@icidca.edu.cu y norge.garrido@icidca.edu.cu

Resumen

El presente trabajo constituye un análisis comparativo sobre la utilización del bagazo como combustible directo para la generación y cogeneración, o para la producción de etanol.

Como resultado se ha obtenido que el bagazo siempre tenga un valor de uso mucho mayor como combustible directo en la generación de energía eléctrica y térmica, que como materia prima para la producción de etanol mediante su hidrólisis. Con ello se logra vender excedentes de electricidad a la red nacional, a partir de esquemas eficientes de producción de azúcar que aportan el bagazo sobrante necesario, y de eficientes esquemas de cogeneración que deberán concluir con la gasificación del bagazo y la generación en ciclos combinados. Además, se podrán obtener ganancias por la venta de créditos de carbono por la reducción en la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero.

Palabras

clave:

Bagazo, etanol, ciclo Rankine, ciclo combinado, hidrólisis ácida y enzimática.

Introducción

Durante las últimas décadas, la comunidad internacional ha tomado conciencia de los grandes problemas que aquejan a nuestro planeta y de la necesidad de ir hacia un desarrollo sustentable. Uno de los grandes problemas a ser resueltos es la reducción del consumo de combustibles fósiles, por un lado, debido al agotamiento inevitable de las reservas por los altos niveles de consumo, y por otro, por la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero que afectan el medio ambiente. Por esta razón es que en los últimos años se han buscado nuevas fuentes de energía, renovables y limpias, que ayuden a reducir el consumo de aquellos y la consiguiente emisión de gases contaminantes.

Entre las fuentes renovables de energía en estudio, la más antigua, utilizada y difundida, es la energía obtenida a partir de la biomasa, sobre la que se realizan estudios de optimización de los procesos de combustión para alcanzar mayores rendimientos y eficiencias, y se estudian nuevas tecnologías, como son los procesos termoquímicos y la gasificación. Entre las plantas utilizadas para fines bioenergéticos se destacan las gramíneas, como la caña de azúcar, cuya eficiencia fotosintética es de las más altas entre todos los vegetales, razón por la cual la agroindustria azucarera es considerada una gran fuente de producción de energía [BNDES, 2008]. Como resultado de la molienda de la caña se obtiene el bagazo, que es utilizado para autoabastecer a la industria energéticamente (potencia y calor en sistemas de cogeneración) y como derivado tradicional, el etanol, que normalmente se obtiene de las mieles finales, pero que también puede obtenerse de mezclas de jugo y miel, y de jugo de caña directamente.

Por otra parte, durante la última década, el etanol ha devenido como gran solución, pues no sólo puede ser utilizado como combustible automotor directamente, sino que en mezclas con hidrocarburos se logra disminuir las emisiones dañinas en los vehículos automotores, debido a que su gran contenido de oxígeno (35%), junto a otras características, permiten una combustión más limpia y un mejor desempeño de los motores, lo que conlleva a la reducción de las emisiones contaminantes, cumpliendo con ello lo establecido en el Tratado de Kyoto [BNDES, 2008; Aguilar, 2007].

En los últimos tiempos, debido a la necesidad de incrementar la producción de bioetanol utilizando nuevas materias primas que no posean valor alimenticio, se ha incrementado el estudio de los procesos de hidrólisis (ácida y enzimática), con el objetivo de separar la lignina de la celulosa y hemicelulosas de los materiales lignocelulósicos, y convertirlas en etanol. Así, en los países productores de azúcar y etanol a partir de la caña, se ha pensado en la utilización de estos procesos para producir bioetanol del bagazo, material lignocelulósico, que se dispone en la misma fábrica sin necesidad de ser recogido y transportado desde las áreas de plantación a las plantas procesadoras [Núñez, s/a]. Pero, ¿vale realmente la pena utilizar un material que de por sí constituye un combustible, con una utilización bien estudiada y cuyos procesos de combustión han sido optimizados, y aún se pueden optimizar más, para producir otro combustible?

El presente trabajo no pretende realizar un análisis detallado de la factibilidad de la producción de bioetanol o de bioelectricidad a partir del bagazo de la caña de azúcar, pero sí pretende introducir el tema a discusión, con el objetivo de hacer un uso verdaderamente racional de esta fuente de energía, sobre todo si se tiene en cuenta que la caña de azúcar puede llegar a representar, por medio del bioetanol y de la bioelectricidad, la segunda fuente primaria, y la principal fuente renovable en la matriz energética de los países productores de azúcar y etanol de caña.

Materiales y métodos

Características generales del bagazo de la caña de azúcar

El bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero, constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista físico, el bagazo integral se compone de 45% de fibra, 2-3% de sólidos insolubles, 2-3% de sólidos solubles y 50% de humedad, mientras que desde el punto de vista químico, se compone de 46,6% de celulosa, 25,2% de hemicelulosas (pentosanos) y 20,7% de lignina. Las hemicelulosas abarcan un conjunto de polisacáridos diferentes, cuya composición tiene como características comunes: solubilidad en solventes, reactividad frente a los ácidos y descomposición en azúcares y furfural. Estas propiedades las diferencian, analíticamente, del resto de los componentes químicos del bagazo. La lignina, tercer componente en importancia cuantitativa del bagazo, entre 20 y 22%, representa un conjunto de polímeros amorfos, reticulares, de altos pesos moleculares y naturaleza eminentemente fenólica [ICIDCA, 2000].

En cuanto a los usos del bagazo, es necesario tener en cuenta el creciente desarrollo de la industria de los derivados, es decir, de la diversificación de la industria como manera de reevaluación económica de la misma, y su tradicional compromiso energético, los cuales comienzan a adquirir una relevante significación económica. Dentro de los derivados de mayor interés en los últimos tiempos está el etanol, por la disponibilidad del bagazo en la fábrica de azúcar, lo que disminuye los costos de producción porque se prescinde de los procesos de aumento de densidad, y de la transportación automotor, entre otros.

El bagazo ha sido utilizado históricamente como combustible en la industria azucarera, y aún cuando su valor calórico es relativamente bajo (1 850 kCal/kg), al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible, y a la vez son grandes

productores de azúcar de caña. Así, si en el pasado los esquemas de producción de azúcar se calculaban energéticamente, de manera tal que el bagazo sirviera de combustible para la generación de la potencia y el calor necesario en la industria, con el mínimo o ningún sobrante, es decir, con “0” bagazo residual, en la actualidad se buscan esquemas energéticos y de procesos que aseguren la mayor cantidad de bagazo sobrante para la producción de derivados y, sobre todo, en los últimos años, para generar electricidad, que se aporta (se vende) a la red, sustituyendo fuel-oil y asegurando la venta de créditos de carbono con un material renovable en cada zafra. En este sentido, se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que se genera, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima para otras producciones.

Por otra parte, la existencia cada vez menor de materiales fibrosos para ser empleados como materia prima en la industria de derivados, y su carácter renovable, han estimulado también en las últimas décadas un desarrollo acelerado de la utilización del bagazo en producciones de derivados [ICIDCA, 2000].

Características generales del bioetanol

El término bioetanol se refiere al alcohol etílico de fórmula C_2H_5OH , conocido también como etanol, metil carbinol, alcohol de caña, o de granos. Es un líquido incoloro, transparente, volátil, de olor etéreo, sabor picante, y miscible en agua y en diversos líquidos orgánicos. Se emplea en la industria destilado con diferentes grados de pureza, según su destino. Normalmente se comercializa en forma hidratada (de 95 a 96% v/v), o anhidra (mayor de 99% v/v) [ICIDCA, 2000].

La producción de bioetanol se realiza en bases comerciales por dos vías tecnológicas (Fig. 1): utilizando materias primas dulces, directamente fermentables, como la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el sorgo sacarino o sorgo dulce, o mediante el uso de materias primas amiláceas, como el maíz, el trigo y la yuca, cuyo almidón debe ser convertido en azúcares (sacarificado) antes de la fermentación. Una tercera vía sería el uso de la biomasa disponible en materiales como el bagazo y la paja de caña, mediante la hidrólisis de las cadenas celulósicas, produciendo una solución de azúcares fermentables Esta vía presenta gran interés gracias al bajo costo de la materia prima, pero aún no está disponible en escalas comerciales, aunque existen expectativas de que en los próximos años pueda alcanzar viabilidad económica [BNDES, 2008].

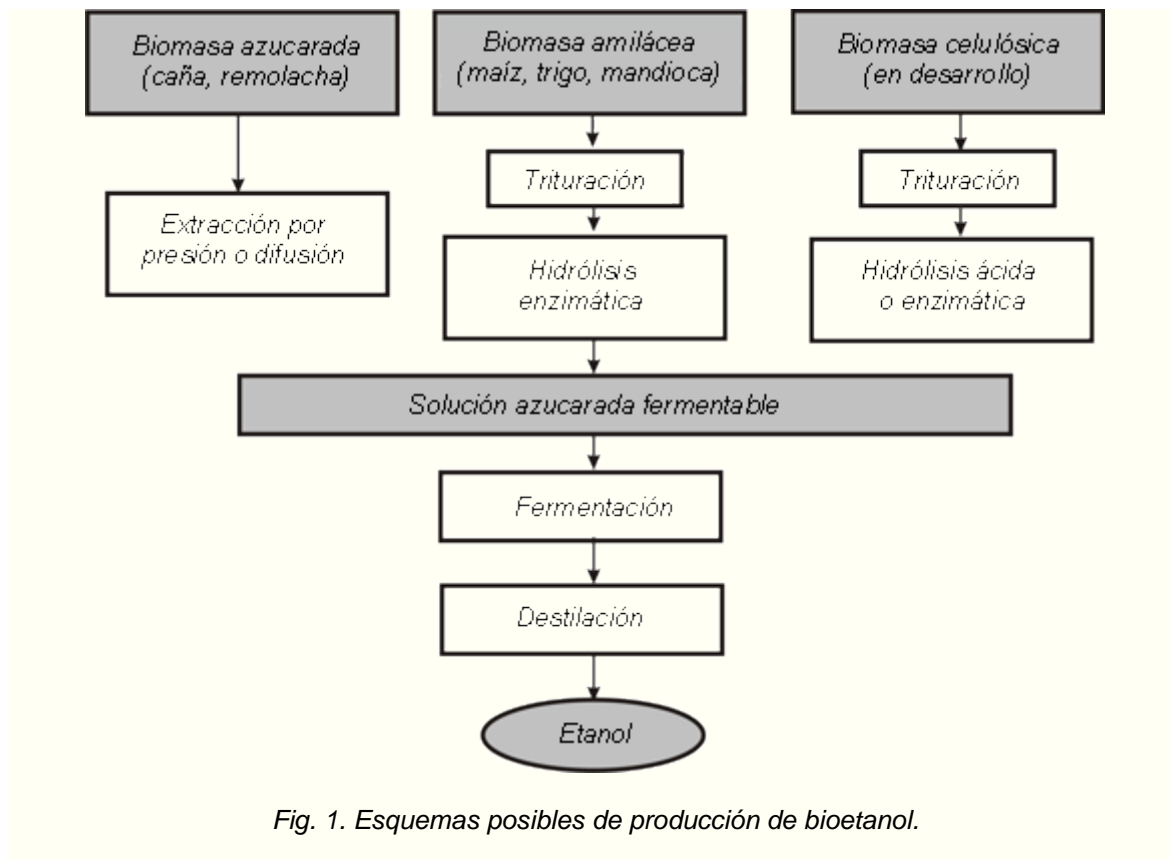


Fig. 1. Esquemas posibles de producción de bioetanol.

Desde el inicio de los años setentas del pasado siglo, a causa de la crisis energética de aquellos años, el etanol ha tomado auge. Su uso fundamental ha sido como sustituto de la gasolina debido a que sus mezclas aumentan el octanaje de forma adicional y permite reducir el empleo de tetraetilo de plomo, que posee acción cancerígena. Adicionalmente la sustitución total de la gasolina por alcohol permite reducir en los gases de escape el monóxido de carbono y óxido de nitrógeno, los cuales son altamente nocivos. En la actualidad, se ha incrementado nuevamente su utilización, y aunque hubo un período de decrecimiento de su producción y uso, a partir del 2000 y debido a la necesidad de reducción del uso de los combustibles fósiles y de la oxigenación de las gasolinas para disminuir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, su utilización en mezclas con la gasolina ha devenido práctica obligatoria en los países firmantes del tratado de Kyoto [BNDES, 2008; Núñez. s/a].

Otros usos importantes del alcohol son como antiséptico, solvente, agente preservante y precipitante, disolvente de nitrocelulosa, gomas, resinol, jabón, aceites esenciales, drogas, ceras, en la elaboración de bebidas alcohólicas, en la electrónica, y muchos otros. Últimamente ha ganado interés el empleo del etanol como materia prima para la fabricación de sustancias químicas (alcoquímica).

Se deben observar una serie de aspectos referentes a la materia prima en la producción de etanol [BNDES, 2008]:

1. Las materias primas más adecuadas para la producción de alcohol son aquellas que, en un sentido amplio, se muestran más eficientes. Así, vale priorizar los cultivos que minimicen los requerimientos de tierra, agua y aportes externos, de agroquímicos fundamentalmente.
2. Debe ser tomada en cuenta la viabilidad económica, pues no tiene sentido proponer el uso de cultivos nobles y con buen valor de mercado, como fuente de bioenergía, mucho menos en estos

momentos y sobre todo, si el valor energético de la biomasa propuesta como materia prima supera al del etanol que se produciría a partir de esta. Sólo en países en los que se le han otorgado precios de oportunidad al etanol, por encima de los precios de la electricidad, podría desestimarse este aspecto.

3. La materia prima representa, típicamente, entre 60 y 70% del costo final del bioetanol, y la búsqueda de alternativas de bajo costo es fundamental.

4. La existencia de coproductos y subproductos de valor alimenticio, industrial o energético, es otro aspecto importante.

5. El balance energético de cada una de las materias primas, o sea, la relación entre la energía producida y la demanda de energía, directa e indirecta, para producir tal energía. En este sentido, son más interesantes los cultivos de alta productividad y baja demanda de insumos energéticos exógenos, es decir, los de mayor grado de conversión (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación energética de las diferentes materias primas para la producción de etanol

| Materia prima | Relación de energía | Emisiones evitadas |
|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Caña | 9,3 | 89% |
| Maíz | 0,6 - 2,0 | -30% a 38% |
| Trigo | 0,97 - 1,11 | 19% a 47% |
| Remolacha | 1,2 - 1,8 | 35% a 56% |
| Mandioca | 1,6 - 1,7 | 63% |
| Residuos lignocelulósicos* | 8,3 - 8,4 | 66% a 73% |

Analizando los aspectos antes expuestos, cabe preguntarse si, independientemente que los altos niveles de conversión energética y de reducción de gases de efecto invernadero apunten hacia una alta viabilidad de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar, sería prudente producir etanol del bagazo atendiendo a su buen valor de mercado como fuente de bioenergía.

Producción de energía vs. producción de etanol a partir del bagazo de la caña

Si el valor calórico o calorífico de una sustancia combustible, es el calor que puede ser generado con la combustión de la unidad de peso de la misma, entonces, atendiendo a los valores calóricos del bagazo integral (50% de humedad) y del etanol, podemos hacer una primera comparación entre ambos, para conocer si realmente se justifica la conversión del bagazo a etanol en vez de utilizar otras materias lignocelulósicas para esos fines, y utilizar el bagazo como generador de energía eléctrica.

Se distinguen dos tipos de valor calórico, o calorífico: el «valor calorífico superior» y el «valor calorífico inferior». El primero, indica el calor que puede obtenerse teóricamente con el combustible, que es alcanzable debido a que, en la práctica, es imposible reducir la temperatura de los productos de la combustión hasta la temperatura de rocío. Téngase en cuenta que: «el valor calorífico superior es aquel que se produce con la combustión de un kilogramo de combustible, a 0 °C y 760 mmHg de presión, donde todos los productos de combustión se reducen a las mismas condiciones, y el agua presente en el combustible, así como aquella que se forma por la combustión del hidrógeno presente, se condensa». El segundo, valor calorífico inferior, o neto, no es más que «aquel que supone que el agua presente en el combustible, así como la que se forma en la combustión, permanecen en estado de vapor» [Hugott, 1967]. Es este valor calorífico inferior, el que da la indicación más precisa del calor que puede obtenerse realmente, y es entonces el que debe ser utilizado en la práctica y

calculado, ya que no existe ningún método para determinarlo directamente.

Entonces, tomando el valor calorífico inferior del etanol puro por tablas, que es 26 790 kJ/kg, (6 399 kCal/kg), y calculando el del bagazo integral a 50% de humedad, de acuerdo a la expresión reportada por Hugot [1967]:

$$V.C.N. = 4\ 250 - 4\ 850 w = 4\ 250 - 4\ 850 (0,5) = 1\ 850\ \text{kCal/kg}$$

Donde:

w: Porcentaje de humedad del bagazo. En la expresión anterior, ya se tuvieron en cuenta las pérdidas de calor en la producción de vapor en la fábrica. De acuerdo con lo anterior, 1 t de bagazo integral a 50% de humedad, puede producir en combustión, un calor de 1 850 000 kCal. Por otra parte, de acuerdo a la estequiometría de los procesos actuales de conversión de bagazo a etanol mediante hidrólisis, tanto ácida como enzimática, con una tonelada de bagazo sólo se pueden obtener 186 L de etanol total (Fig. 2).

Por lo tanto, con 186 L de etanol que se producen con una tonelada de bagazo [Nuñez] se puede producir un calor en combustión de:

$$186\ \text{L} \times 0,79\ \text{kg/L}) \times 6\ 399\ \text{kCal/kg} = 940\ 269,06\ \text{kCal}.$$

Entonces, si comparamos el calor que puede ser producido por la combustión de una tonelada de bagazo integral a 50% de humedad, y el calor que puede ser producido con los 186 litros de etanol que se obtienen actualmente por los métodos de conversión de celulosa a etanol mediante hidrólisis, se obtienen 909 731 kCal más:

$$1\ 850\ 000 - 940\ 269 = 909\ 731\ \text{kCal}.$$

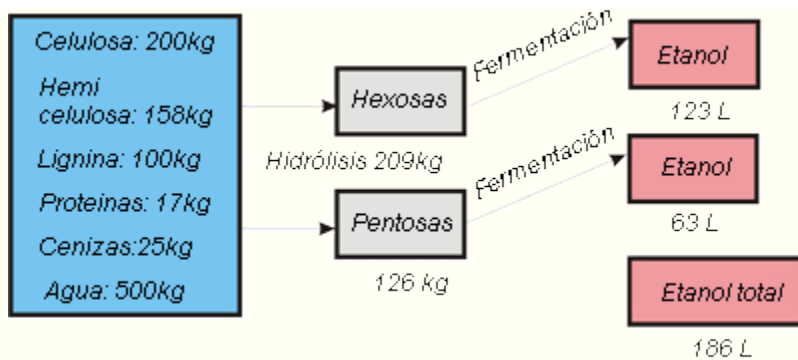


Fig. 2. Estequiometría de la conversión de una tonelada de bagazo integral a etanol.

Del análisis anterior se observa que al convertir una tonelada de bagazo a etanol mediante los procesos actuales de conversión por hidrólisis, en vez de utilizarlo en la generación de potencia y calor, se perderá energía posible a ser producida equivalente a 909 731 kCal.

Sin embargo, la bibliografía plantea que podrá llegarse a convertir bagazo a etanol mediante hidrólisis en una relación de hasta 400 L/t de materia celulósica. Teniendo en cuenta que la celulosa y las hemicelulosas representan entre ambas 71,8% del bagazo integral, la relación anterior correspondería a 287 L de etanol/t de bagazo integral, y el análisis anterior reflejaría que con la combustión del etanol que se produciría con la conversión de una tonelada de bagazo, se obtendrá una cantidad de calor por combustión (del etanol) equivalente a:

$$(287 \text{ L} \times 0,79 \text{ kg/L}) \times 6 \times 399 \text{ kCal/kg} = 1 \ 450 \ 845,27 \text{ kCal.}$$

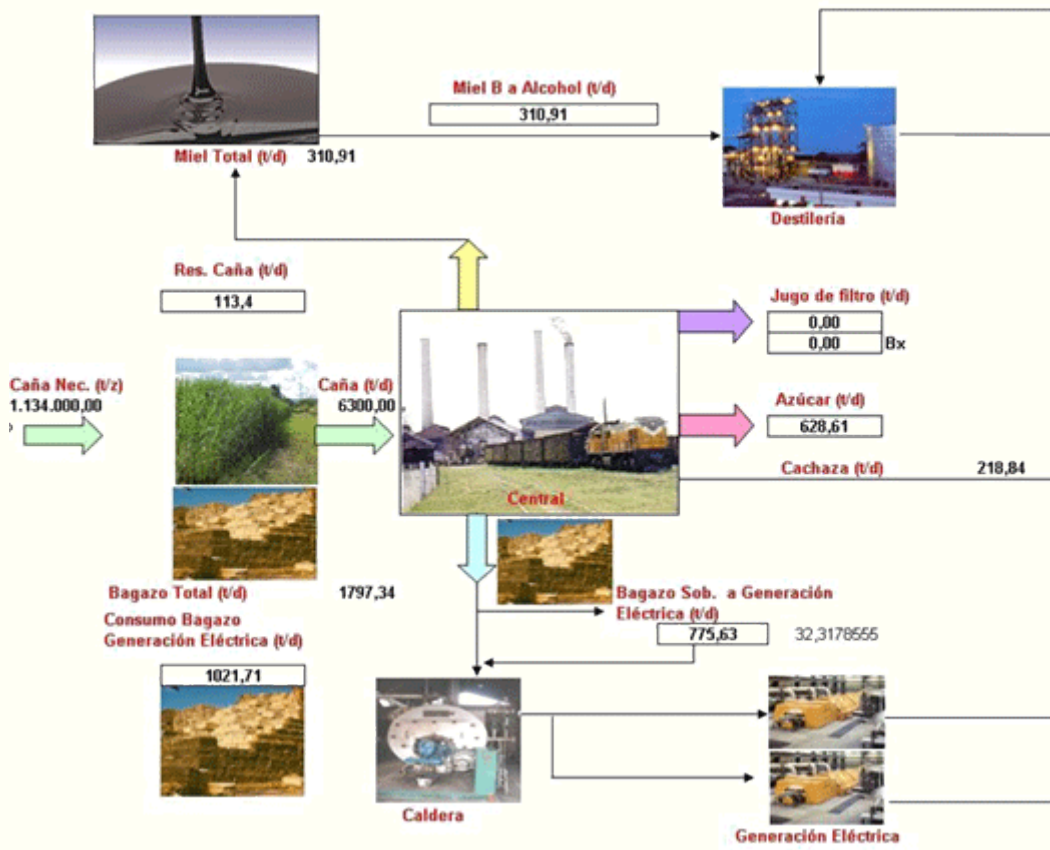
De este nuevo análisis se desprende que, aún con el incremento a niveles máximos de la cantidad de etanol obtenido por tonelada de bagazo mediante procesos de hidrólisis, se obtendrían 399 115 kCal más con la combustión directa del bagazo.

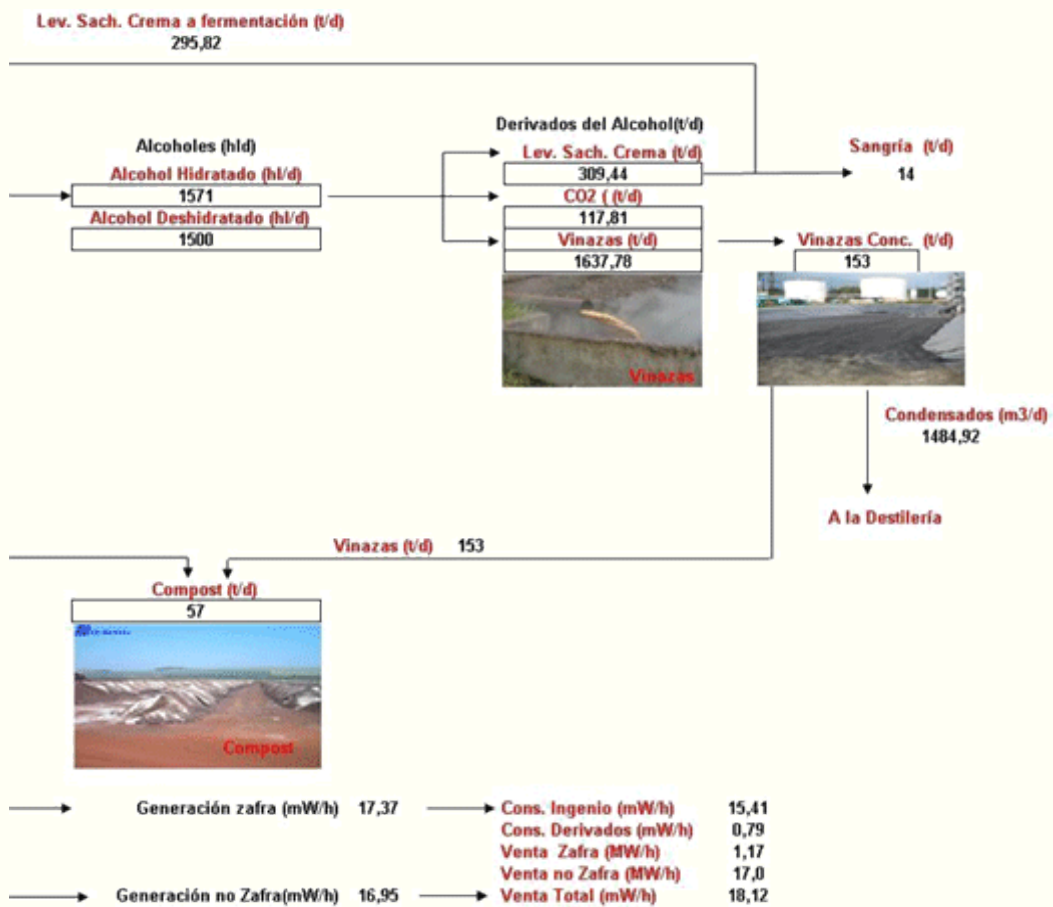
Análisis de dos casos de estudio

Si se toman dos casos de estudio de producción diversificada, el primero con producción de azúcar y de etanol a partir de miel final, y el segundo, con producción de azúcar y de etanol a partir de miel B y jugo de los filtros, tendremos como resultados los mostrados en los esquemas de las figuras 3 y 4, obtenidos en corridas del programa DAFLEX (Diversificación Azucarera Flexible) desarrollado en el ICIDCA sobre hoja de cálculo EXCEL [Díaz, *et al.*, 2002]. Los esquemas anteriores se calcularon tomando como base los parámetros que se muestran en la tabla II.

Del análisis de ambos esquemas, y de los parámetros de operación de la tabla 2, se observa que las diferencias entre la energía eléctrica generada durante y después de zafra, así como en la energía consumida en los procesos de producción de azúcar y etanol, no son muy grandes; el segundo esquema (Fig. 4) vende 4,64 MWh más durante ambas etapas, que el primero (Fig. 3), en el que resulta mayor la electricidad vendida después de zafra (16,95 MWh), generada con el bagazo sobrante que se emplearía en la producción de etanol, si no se utilizara en la generación de electricidad. Por tanto, partiendo de una producción de 186 L de etanol por tonelada de bagazo con los procesos actuales de hidrólisis de biomasa, se simuló la generación de electricidad a partir del etanol obtenido con el bagazo sobrante en los dos esquemas anteriores, con las mismas condiciones de ambos, y que se presentan en las figuras 5 y 6, donde se observa que la cantidad de etanol producido en ambos esquemas se diferencia sólo en 2,24 t/día, que representan alrededor de 2 835 L de etanol más por día, pero la electricidad que se produce en ambos casos no difiere y es de 4,70 MWh.

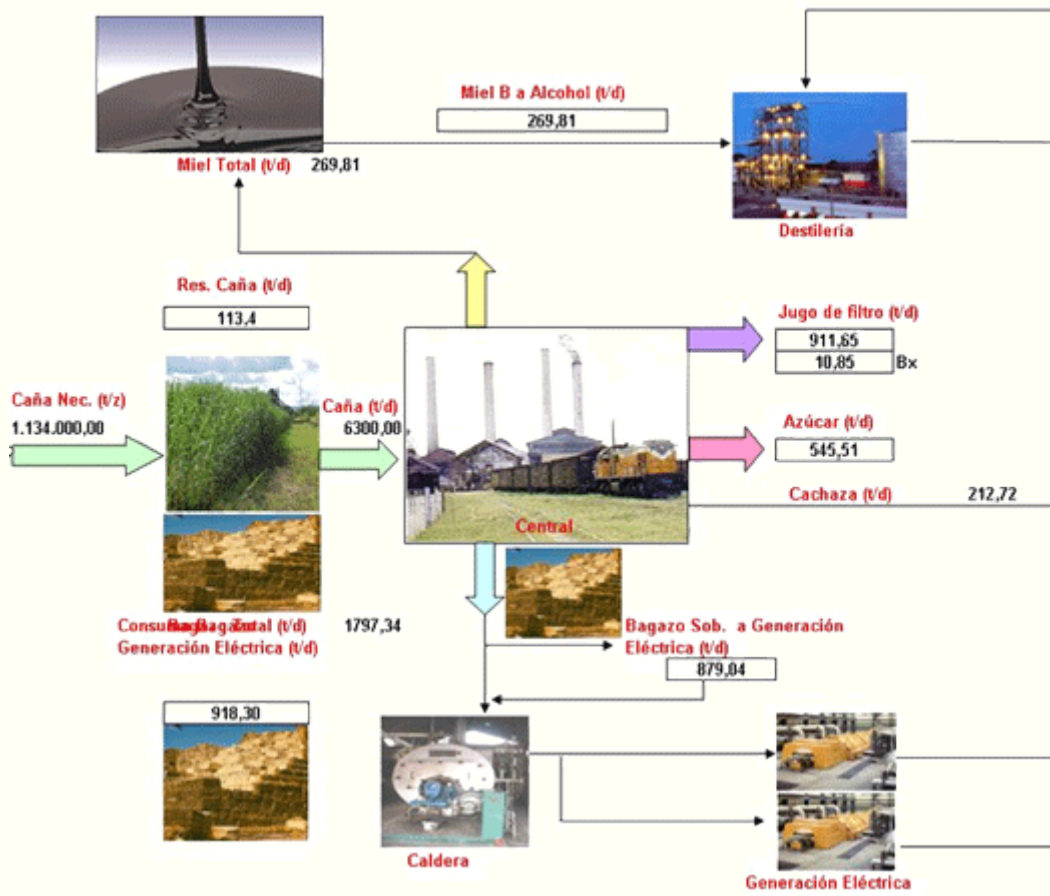
En este caso, si se compara la electricidad que se puede producir con el etanol que se obtiene a partir del bagazo sobrante de los esquemas anteriores, con la electricidad que se genera a partir de la combustión directa del mismo, se corrobora que tal y como se demostró en la comparación de la cantidad de calor que se podía producir con ambos combustibles, con el bagazo se obtiene mucha más energía eléctrica y térmica, que con el etanol producido a partir de éste.





DAFLEX - ICIDCA
21/02/2011

Fig. 3. Esquema de producción diversificada. Miel final a etanol.



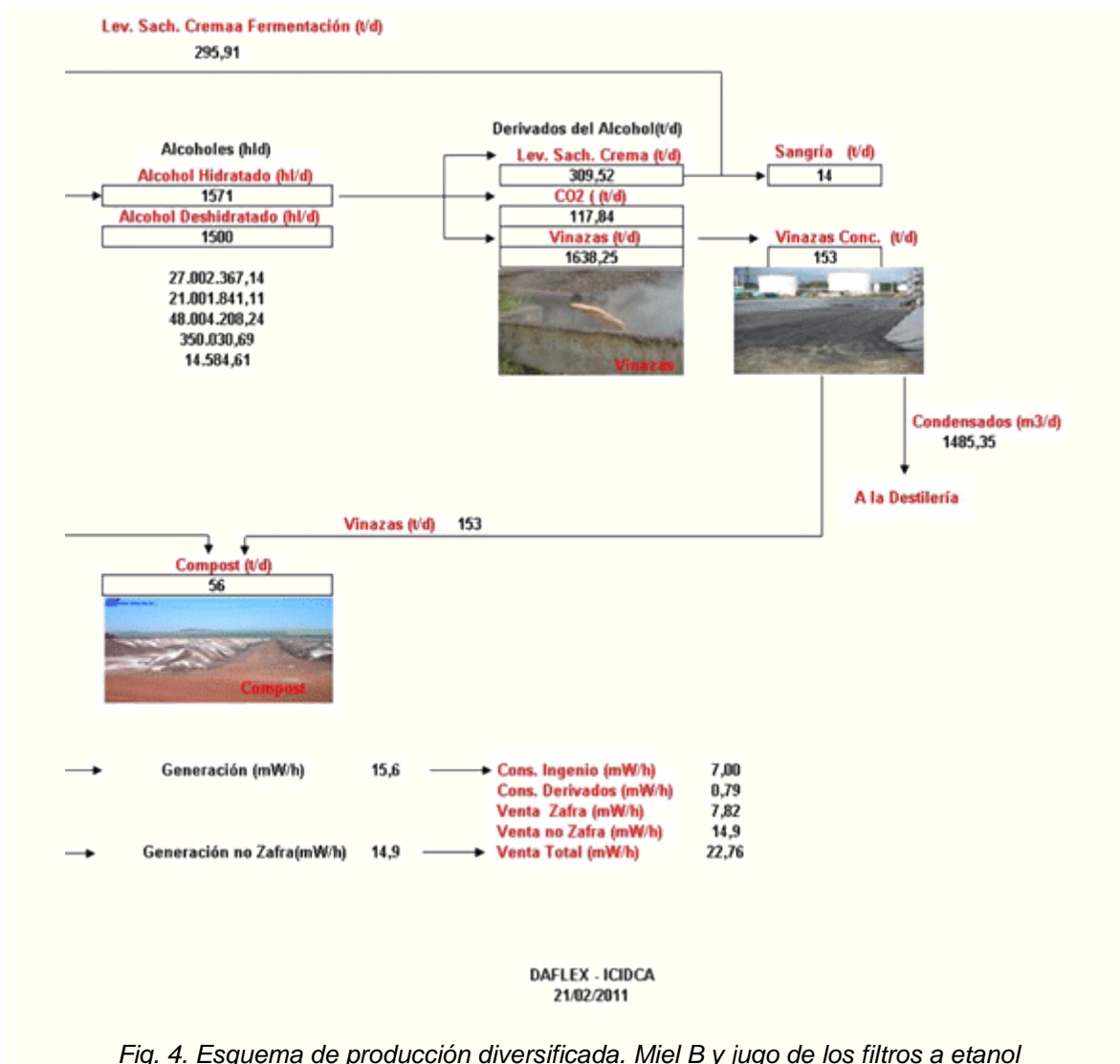
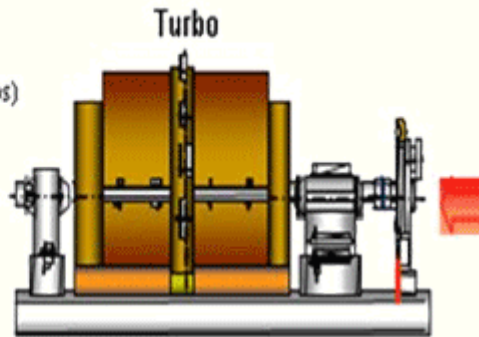


Fig. 4. Esquema de producción diversificada. Miel B y jugo de los filtros a etanol

| | | |
|----------------------|-----------|--------------|
| Presión | 2,50 | kg/cm2 (abs) |
| Temperatura real | 128,28 | °C |
| Temperatura | 128,28 | °C |
| H vapor | 649802,34 | kcal/Kg. |
| Generación Elect. | 4,70 | mwh/h |
| Entropía g/s | 1,64 | kcal/Kg.°C |
| Entropía li | 0,43 | kcal/Kg.°C |
| Humedad | 4,63 | % |
| Cantidad de turbos | 1 | |
| Consumo teórico | 0,01 | Kg/Kwh |
| Entalpía real | 651,73 | kcal/Kg |
| Entalpía de saturac | 651,73 | kcal/Kg |
| Temp. | 142,27 | °C |
| Eficiencia del turbo | 0,80 | % |



| | | |
|------------------------|----------|--------|
| Agua de condensado | 0,00 | t/d |
| Agua tratada | 1206,63 | t/d |
| Agua Reposicion | 8,72 | t/d |
| Temperatura | 100,00 | °C |
| Calor necesario | 7,88E+08 | kcal/d |
| Calor Aport. / alcohol | 2,83E+09 | kcal/d |

| | | |
|---------------------|-----------|---------|
| Capacidad instalada | 290,56 | t/d |
| Vapor total | 1206,63 | t/d |
| Temperatura | 400,00 | °C |
| Entalpía del vapor | 668021,29 | kcal/Kg |
| Consumo Petroleo | 916,07 | t/d |

| | | |
|--------------|-----------|------------|
| Vapor | 1206,63 | t/h |
| Presión Ent. | 42,00 | atm |
| Temperatura | 243,91 | °C |
| H vapor | 668021,29 | kcal/Kg. |
| Entropía g | 1,59 | kcal/Kg.°C |
| Consumo Real | 7,3 | tn/KWh |

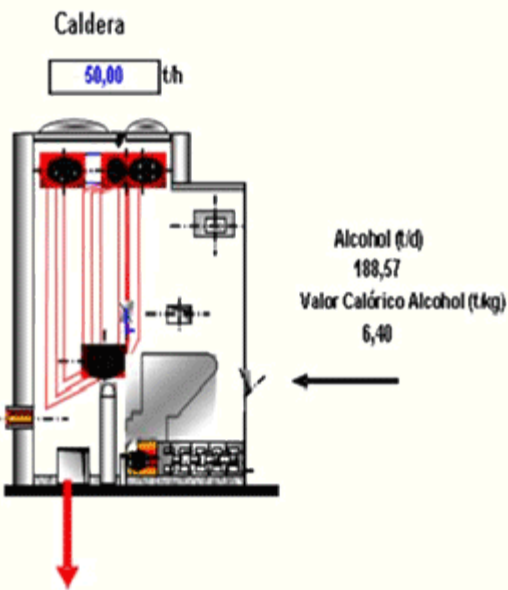
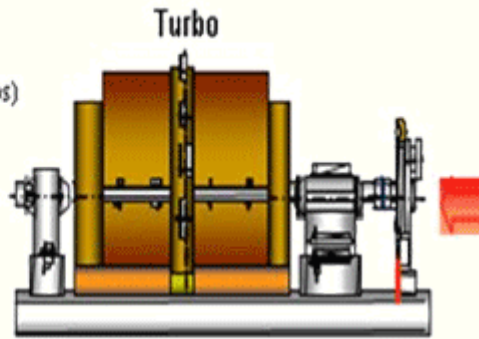


Fig. 5. Generación de electricidad con el etanol producido con el bagazo sobrante en el esquema de miel final a etanol.

| | | |
|----------------------|-----------|--------------|
| Presión | 2,50 | kg/cm2 (abs) |
| Temperatura real | 128,28 | °C |
| Temperatura | 128,28 | °C |
| H vapor | 649802,34 | kcal/Kg. |
| Generación Elect. | 4,70 | mwe.h/h |
| Entropía g/s | 1,64 | kcal/Kg.°C |
| Entropía l/s | 0,43 | kcal/Kg.°C |
| Humedad | 4,63 | % |
| Cantidad de turbos | 1 | |
| Consumo teórico | 0,01 | Kg/Kwh |
| Entalpía real | 651,73 | kcal/Kg |
| Entalpía de saturac | 651,73 | kcal/Kg |
| Temp. | 142,27 | °C |
| Eficiencia del turbo | 0,80 | % |



| | | |
|-------------------------|----------|--------|
| Agua de condensado | 0,00 | Md |
| Agua tratada | 1220,91 | Md |
| Agua Reposición | 8,72 | Md |
| Temperatura | 100,00 | °C |
| Calor necesario | 7,97E+08 | kcal/d |
| Calor A port. / alcohol | 2,03E+09 | kcal/d |

| | | |
|---------------------|-----------|---------|
| Capacidad instalada | 290,56 | Md |
| Vapor total | 1220,91 | Md |
| Temperatura | 400,00 | °C |
| Entalpía del vapor | 668021,29 | kcal/Kg |
| Consumo Petroleo | 930,35 | Md |

| | | |
|--------------|-----------|------------|
| Vapor | 1220,91 | Mh |
| Presión Ent. | 42,00 | atm |
| Temperatura | 243,91 | °C |
| H vapor | 668021,29 | kcal/Kg. |
| Entropía g | 1,59 | kcal/Kg.°C |
| Consumo Real | 7,3 | tn/KWh |

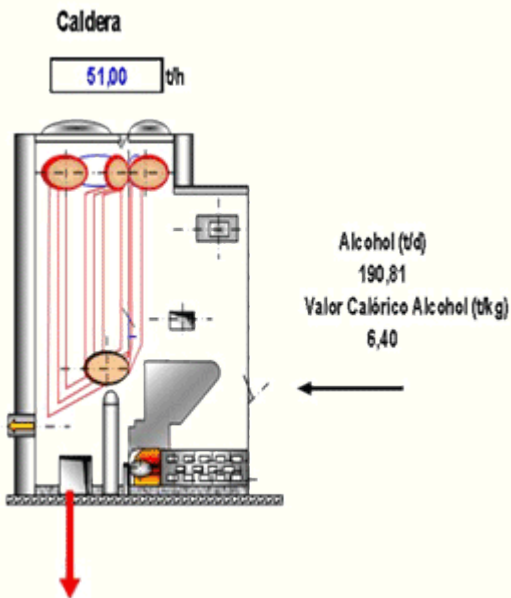


Fig. 6. Generación de electricidad con el etanol producido con el bagazo sobrante en el esquema miel final y jugo de los filtros a etanol.

Tabla 2. Parámetros de la producción de azúcar y etanol de los casos representados en las figuras 3 y 4

| Parámetro | Esquema 1 | Esquema 2 | Parámetro | Esquema 1 | Esquema 2 |
|---------------|-----------|-----------|---------------------------------|-----------|-----------|
| Días de zafra | 180 | 180 | Consumo vapor proceso, t/t caña | 0,26 | 0,26 |

| | | | | | |
|--|--------|--------|---|------------|------------|
| Molienda real, t/día | 6 300 | 6300 | Índice general de vapor, t vapor/t bagazo | 7000 | 7000 |
| Caña molida, t/h | 262,5 | 262,5 | Número y capacidad de turbos | 1 de 15 MW | 1 de 15 MW |
| Bagazo en caña, kg/t caña | 285 | 285 | Eficiencia turbos, % | 0,80 | 0,80 |
| Cantidad de calderas | 1 | 1 | Consumo electricidad azúcar, MWh | 4,08 | 6,07 |
| Capacidad calderas, t/día | 100 | 100 | Consumo electricidad etanol, MWh | 0,79 | 0,79 |
| Presión de vapor vivo, kgf/cm ² | 42 | 42 | Bagazo disponible / calderas, t | 1 797,34 | 1 797,34 |
| Temperatura del vapor vivo, °C | 400 | 400 | Bagazo/generación en zafra, t/día | 1 021,71 | 918,30 |
| Entalpía del vapor vivo, kCal/kg | 766,93 | 766,93 | Bagazo/generación después de zafra, t/día | 775,63 | 879,04 |
| Consumo vapor en turbogeneradores, kg/kW | 5 | 5 | Poder calorífico inferior del bagazo, kCal/kg | 1 850 | 1 850 |
| Presión vapor de escape, kgf/cm ² | 2,5 | 2,5 | Producción electricidad en zafra, MWh | 17,37 | 15,6 |
| Entalpía vapor de escape, kCal/kg | 648,85 | 648,85 | Producción electricidad después de zafra, MWh | 16,95 | 14,9 |

Los parámetros utilizados, sobre todo en cuanto a presión de vapor en la caldera y equipos de cogeneración, son aún modestos si se requiere potenciar la generación de electricidad. Si se realiza un análisis de la evolución técnica que ha sufrido la cogeneración en la industria azucarera, debido a los cambios de filosofía en cuanto a la disponibilidad de bagazo y su uso como fuente de energía, renovable y limpia, para la generación de electricidad, observamos que [Costa, 2008]:

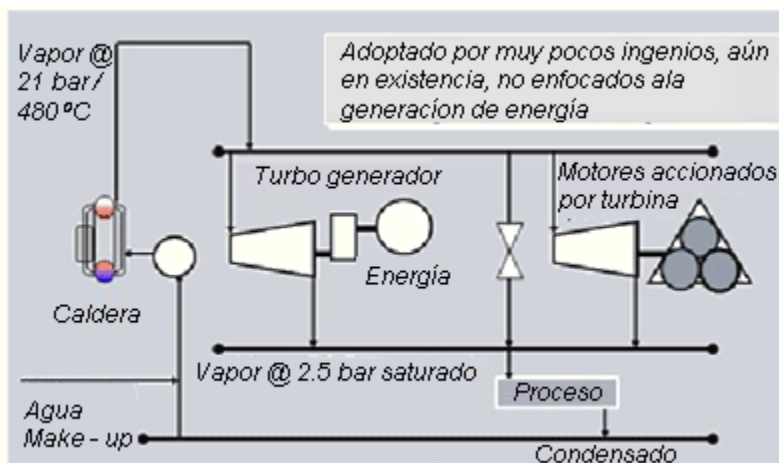


Fig. 7. Diagrama típico o tradicional de un ingenio azucarero.

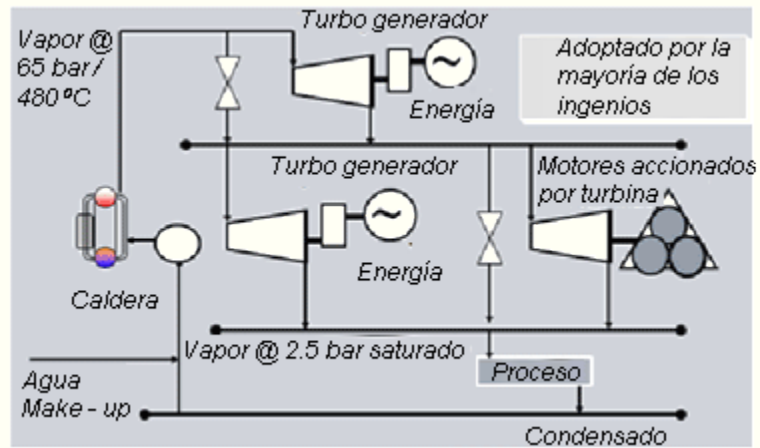


Fig. 8. Diagrama típico optimizado de un ingenio azucarero.

1. Antiguamente, el bagazo era considerado como un residual que ocasionaba un problema ambiental, por lo que debía ser quemado para resolver tal situación, y sólo se producía con él la electricidad y el vapor necesario para el proceso. Las calderas utilizadas eran de baja presión y temperatura, con una eficiencia pobre, al igual que las unidades de cogeneración que, en muchas ocasiones, no satisfacían todas las necesidades del ingenio azucarero. Por lo general, los motores mecánicos eran accionados con pequeñas turbinas de vapor, y sólo las bombas y otros equipos como las centrífugas, y otros, eran accionados por motores eléctricos (Fig. 7).

2. Posteriormente se optimiza el esquema anterior, produciéndose una generación de energía más eficiente, con una mejor relación presión/temperatura (Fig. 8), pero, sin embargo aún no bien optimizada y por debajo de las posibilidades reales. Las calderas de nueva generación tenían todavía una eficiencia media y subsistían aún demasiados motores mecánicos accionados con turbinas pequeñas de vapor, de baja eficiencia. No existía todavía un concepto definido de planta de generación de vapor y energía, pues la generación de electricidad no era todavía una necesidad.

3. Actualmente, la filosofía energética de la industria azucarera y de los derivados ha cambiado, debido al alza de los precios del petróleo, la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, limpias además, para evitar o disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (Fig. 9). Por esta razón, la mayoría de los ingenios azucareros actuales presentan esquemas más eficientes de cogeneración, con mayores presiones, mayores eficiencias y con aporte de electricidad a la red. La producción de energía ha pasado a ser uno de los principales productos del ingenio azucarero, y los esquemas se caracterizan por [Costa, 2008]:

| | | | |
|--------------------|---------|---|-------------|
| Parámetros de alta | presión | y | temperatura |
| calderas de | alta | | eficiencia |

- Reemplazo de turbinas de vapor pequeñas por motores eléctricos con convertidor de frecuencia, por lo que se incrementa la eficiencia global de la planta
- La eficiencia es un objetivo fundamental en todo el ingenio azucarero. En algunos países se utiliza la paja y la punta de la caña como combustibles adicionales al bagazo. Se utilizan equipos de alto comportamiento, rendimiento y eficiencia.
- Se realiza una evaluación técnica de los procesos de gasificación de la paja de la caña y el bagazo, para producir una migración a ciclo combinado.

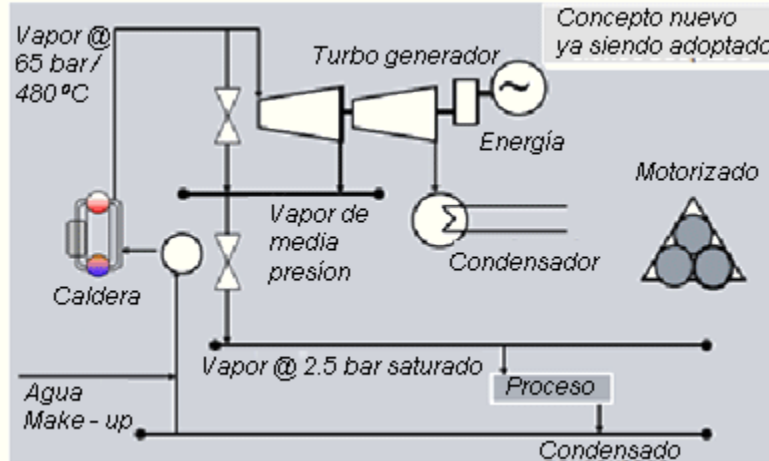


Fig. 9. Diagrama de un ingenio azucarero actual.

En la actualidad, dada la potencialidad de la industria azucarera, las plantas de azúcar y derivados se están convirtiendo en productores de energía, es decir, la energía pasa a ser un producto principal y deja de contemplarse como un subproducto. En los nuevos ingenios azucareros, o en aquellos que se remodelan sobre todo desde el punto de vista energético, se tienen en consideración para el diseño de la planta de cogeneración los siguientes factores [Costa, 2008; Herrera, 2010]:

- Utilización del bagazo sólo, o bagazo más paja de la caña como combustible.
- Parámetros de vapor. Altas presiones y temperaturas con bajo consumo de vapor por kW de electricidad
- Reducción de consumos internos de vapor de proceso en todo el ingenio azucarero.
- Electrificación de los accionadores
- Conexión a la red pública
- Operación del ingenio azucarero sólo en zafra, o fuera de zafra, para producción de electricidad con el bagazo sobrante.
- Uso de nuevas tecnologías. La tendencia actual es la de aumentar la eficiencia de todos los equipos que intervienen en la producción y utilización de la energía, fundamentalmente la caldera y los turbogeneradores, lo que se resume según [Costa, 2008]:
- Parámetros de vapor por encima de 85 bares y 500 °C.
- Producción de energía durante todo el año o la mayor parte de él.
- En cuanto a las turbinas se estimula el uso de una sola turbina de gran tamaño, de condensación-extracción y con álabes de reacción, en vez de dos unidades, una de contrapresión con extracción y otra de condensación, trabajando a 92 bares y 530 °C. La siguiente tabla, compara los anteriores esquemas de cogeneración en cuanto a consumo específico de vapor/kW y energía eléctrica generada en MWh/año [Costa, 2008]:

Tabla 3. Comparación entre los diferentes esquemas de cogeneración

| | | | | |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| Presión, bar | 21 | 42 | 65 | > 90 |
| Temperatura, °C | 300 | 400 | 490 | > 500 |
| Consumo específico, kg vapor/kW | 12,5 | 7,8 | 5,7 | 4,74 |
| Energía generada, MW/año | 38 400 | 61 500 | 84 200 | 101 300 |
| Incremento de generación, % | X | X + 60 | X + 200 | X + 260 |

No obstante, las bondades de la generación y cogeneración examinadas anteriormente con altas presiones y temperaturas de vapor, turbogeneradores de condensación extracción y gran tamaño, el rendimiento del ciclo Rankine es muy malo. Por ejemplo, con turbina y bomba de buenos rendimientos internos (cerca de 85%), un ciclo de Rankine difícilmente supera 30%. Introduciendo mejoras como el sobrecalentamiento, el recalentamiento y la adecuada elección de las temperaturas

y presiones de inicio y término de expansión, los ciclos de Rankine modificados pueden llegar a tener rendimientos cercanos a 40% [Monsalve, 2008].

Para obtener rendimientos más altos, se hace necesaria la incorporación de la tecnología de ciclo combinado, en la que se realiza la generación, mediante gas primero (turbina de gas), y mediante vapor en forma paralela e integrada, en una segunda etapa. De la misma manera, el gas de síntesis obtenido de la biomasa, podría ser tratado y convertido a etanol. Ambos procesos no están disponibles todavía a escala comercial, aún cuando la gasificación ya ha sido realizada a escalas piloto y demostrativa [Yanagihara].

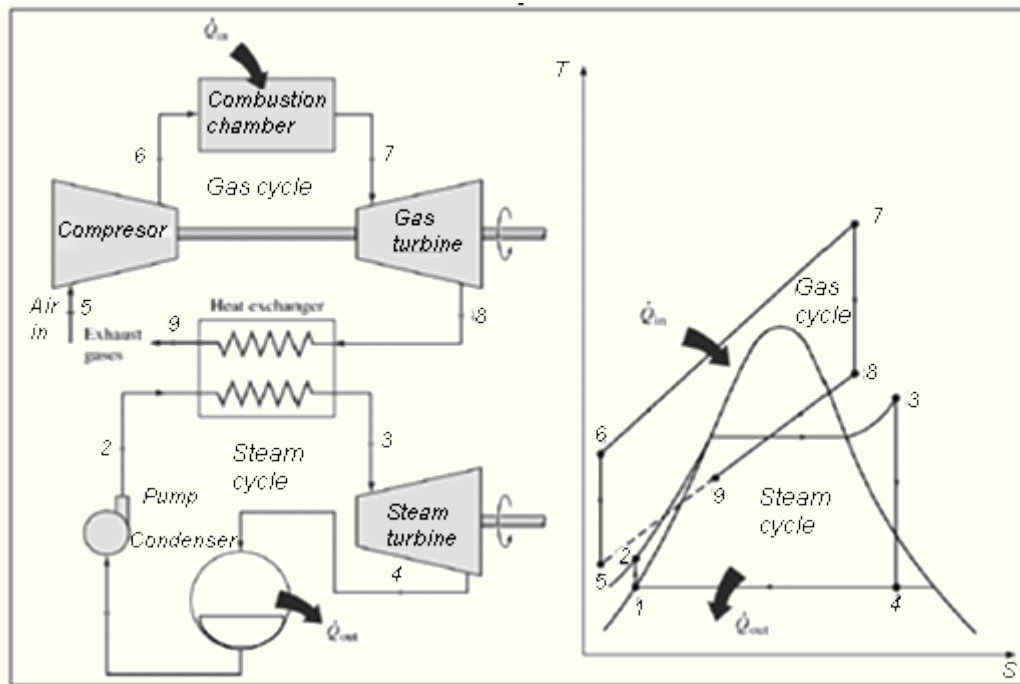


Fig. 10. Esquema y diagrama T vs. S para un ciclo combinado.

Tomando la expresión de eficiencia térmica teórica máxima para cualquier máquina térmica, hacemos un análisis comparativo sencillo entre el ciclo Rankine y el ciclo combinado, partiendo de las siguientes condiciones: 1 100 °C de temperatura de combustión del bagazo, en el ciclo Rankine se obtiene vapor en la caldera a 520 °C, y se condensa a 70 °C, temperatura de salida de la turbina de gas es de 520 °C (se considera igual al del ciclo Rankine, lo cual no es cierto, pues no se pierde tanto calor en una turbina de gas), y 20% de pérdidas en la caldera de recuperación que genera vapor a 400 °C, con 70 °C en el vapor condensante, se tiene [AADECA, 1994; Lesme]:

- Ciclo Rankine: $(1 - (70 + 273) / (520 + 273)) * 100 = 56,7\% \eta$
- Ciclo combinado: $(1 - (550 + 273) / (1100 + 273)) + \eta (80 / 100) * ((550 + 273) / (1100 + 273)) * (1 - (70 + 273) / (400 + 273)) = [0,40 + 0,23] = 0,63 = 63,0\% \eta$

Del análisis anterior se desprende que aún imponiéndole al ciclo Bryton del ciclo combinado, las pérdidas de calor del ciclo Rankine, que no son ciertas, éste siempre tendrá como mínimo 10% de eficiencia por encima del Rankine. Un análisis más preciso se hubiera realizado con las expresiones de eficiencia de cada ciclo, con sus características. Por lo general, las diferencias entre ambos son muchísimo mayores.

Conclusiones

1. Inobjetablemente, el bagazo de la caña de azúcar tendrá siempre un valor de uso mucho mayor como combustible directo, que como materia prima para la producción de etanol.
2. La tendencia futura es la de lograr establecer, de manera económica y a mayor escala, la tecnología de gasificación de los materiales lignocelulósicos en general, y del bagazo de caña en particular, con la que se lograrán eficiencias mucho mayores en la producción de electricidad a partir de biomasa.
3. Sería de gran utilidad, aún con el ciclo Rankine mejorado (altas presiones y temperaturas, entre otras mejoras), adicionar los residuos de la cosecha cañera (RAC) tratados mecánicamente y mezclados con el bagazo, para incrementar la capacidad de generación de electricidad, y las ventas a la red durante y fuera de zafra.
4. El rendimiento actual de la tecnología de obtención de etanol de biomasa a partir de hidrólisis, tanto ácida como enzimática (186 L de etanol/t de bagazo), así como los rendimientos máximos posibles que se vislumbran con esta tecnología (~ 300 L de etanol/t de bagazo), no superan en valor energético las posibilidades de generación de energía eléctrica y térmica, a partir de la combustión directa de este material, con las tecnologías de cogeneración actuales, y mucho menos con la utilización de los ciclos combinados.
5. La generación de energía eléctrica a partir de bagazo, puede servir, además, para la venta de créditos de carbono, por evitar la emisión de gases de efecto invernadero, con lo que se logra la reevaluación de su uso como combustible limpio.
6. La gasificación del bagazo y la utilización de los ciclos combinados de generación y cogeneración, unido al establecimiento a escala comercial de la utilización del gas de síntesis para la producción de etanol, podrían, dada la eficiencia de ambos, permitir compromisos de generación eléctrica y de obtención de etanol, con balances económicos adecuados.
7. Independientemente a la afirmación anterior, sólo se podría pensar en la utilización del bagazo para la producción de etanol, en países con disponibilidad de otros recursos energéticos para la generación y cogeneración de electricidad, y con grandes reservas de hidrocarburos, que necesiten de grandes cantidades de etanol para la oxigenación de sus gasolinas, o su uso como combustible líquido para cumplimentar el Tratado de Kyoto, o de otros que, sin adecuadas reservas de combustible, posean grandes parques automotores. No obstante, tendrían que ser insuficientes las posibilidades de obtención de este combustible por los métodos tradicionales. Este caso podría ser por ejemplo, el de Venezuela, EE.UU. y Brasil, aunque éste último requiere mayor potencialidad hacia la generación de electricidad, que hacia la producción de etanol [BNDES, 2008].

Recomendaciones

1. Realizar estudios de factibilidad técnico-económicos que ayuden a establecer adecuadamente los usos más racionales del bagazo en cada caso particular.
2. Acelerar los estudios de ingeniería para la solución de los problemas que impiden el establecimiento a gran escala de la gasificación del bagazo, y de los ciclos combinados de generación y cogeneración.
3. Establecer los mecanismos para lograr la utilización de los RAC junto al bagazo, en la generación y cogeneración, lo que incrementará las capacidades actuales.
4. Para lograr la introducción adecuada de los RAC deberán estudiarse las distancias máximas de recolección de los mismos, que actualmente se establece para las condiciones cubanas en de 10 km del ingenio azucarero, aproximadamente; los tratamientos necesarios, así como el lugar de realización de los mismos para obtener las mejores relaciones costo/beneficio.

Bibliografía

- AADECA (1994). *Calderas II. Control avanzado*. Cuadernos profesionales.
- AGÜERO, CARLOS; JORGE PISA, JORGE Y ROBERTO ANDINA (2006). En *Investigación y Desarrollo*, no. 27. ISSN 1668-9178.
- AGUILAR, N. (2007). En *Avances en Investigación Agropecuaria*. ISSN 0188-7890.
- AGUILAR, N.; D. RODRÍGUEZ Y A. CASTILLO (2010). En *Revista VIRTUALPRO*, no. 106. ISSN 1900-6241. www.revistavirtualpro.com.
- BNDES, CGEE, FAO y CEPAL (2008). http://www.sugarcanebioethanol.org/es/download/resumo_executivo.pdf
- COSTA, P. (2008). En XIV Seminario de Ahorro de Energía, Cogeneración y Energías Renovables.
- DIAS, M.; M. CUNHA, CH. JESUS, M. SCANDIFFIO, C. ROSSELL, R. FILHO Y A. BONOMI (2010). En 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20, ELSEVIER B.V. DÍAZ, M.; O. CAPOTE Y N. GARRIDO (2005). DAFLEX: Herramienta para el análisis de procesos en la industria azucarera. Software. Base Excel, 2005.
- ENRÍQUEZ, M. (1998). C.N.I.A.A. *Revista Ingenio*.
- FERNÁNDEZ, M. Y A. ALCARAZ. (2001). En *Boletín IIE*, nov.-dic., 2001.
- GARCÍA, J.; R. ROMERO Y D. SALES (2008). En *Boletín del CIDEUS* 5, 31-51. ISSN 1885-5237.
- GARRIDO, N. (2005) SIDEL: Herramienta para el análisis de procesos en la industria alcoholera. Software base Excel.
- GIANELLA, J. (2010). COBER IV.
- HERRERA, O. (2010). En I Seminario Internacional Universidad-Estado-Sociedad.
- HUGOTT, E. (1967). Manual para ingenieros azucareros. La Habana: Ed Revolucionaria, 1967.
- ICIDCA (2000). Manual de los derivados de la caña de azúcar. 3ª edición.
- ISLAS, J. Y A. MARTÍNEZ (2009). En *Ide@s CONCYTEG*, 4, no. 54.
- LESME, R. <http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/GasificacionPartirBiomasaCanera.pdf>
- MONSALVE, E.; P. CECCHI, A. VIDAL Y A. ZÚÑIGA (2008), Informe 1, ME64A Centrales térmicas de potencia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Física y Matemática, Universidad de Chile.
- NÚÑEZ, JOSÉ P. (s/a), Diplomado Práctico en Energías Alternativas, COPERSUCAR, SP., Brasil.
- OCAMPO, AQUILES (2004). En *Revista EIA*. ISSN 1794-123.
- PÉREZ, R. (2011). En *Eco Solar*, CUBASOLAR. www.cubasolar.cu.
- PINEDA, G. (2011). Ciclo Rankine, monografias.com.
- REYES, J.; R. PÉREZ Y J. BETANCOURT (2011). En *Eco Solar*, CUBASOLAR. www.cubasolar.cu.
- RODRÍGUEZ, A. (2011). En *Eco Solar*, CUBASOLAR. www.cubasolar.cu.
- SILVA, E. TORRES, J. Y R. TORRES. http://www.nodo50.org/cubasigloXXI/economia/torresmp_310307.pdf
- VALDÉS, A. Y P. ROQUE.
- YANAGIHARA, J. <http://143.107.98.150/Jurandir/cicloBrayton.pdf>