

INTEGRACIÓN Y ESQUEMAS ENERGÉTICOS PARA EL MÁXIMO APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA CAÑERA EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

INTEGRATION AND ENERGY SCHEMES FOR MAXIMUM USE OF SUGARCANE BIOMASS IN ELECTRICITY GENERATION

Angel Rubio-González^{1} y Manuel Rubio Rodríguez¹*

¹ Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 12, 2017; Revisado: Marzo 14, 2018; Aceptado: Mayo 14, 2018

RESUMEN

El máximo aprovechamiento de la biomasa cañera con vista a la generación y comercialización de electricidad resulta vital para la supervivencia de la industria azucarera moderna. En el presente trabajo se abordan y caracterizan un conjunto de alternativas para la integración de la planta energética y la fábrica de azúcar, así como, dos esquemas energéticos para dicha planta energética. En ambos casos el objetivo es el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera con vista a la generación y comercialización de electricidad. Adicionalmente, se presenta un conjunto de elementos de partida que deben evaluarse para un adecuado proyecto de generación y comercialización de electricidad a base de biomasa cañera.

Palabras clave: alternativas de integración; bioeléctrica; biomasa cañera; cogeneración; esquemas energéticos; generación de electricidad.

ABSTRACT

The maximum use of sugarcane biomass for electricity generation and commercialization is vital for sugar cane industry. In present work, a set of alternatives for cogeneration plant and sugar cane factory integration is proposed and characterized, as well as two energy schemes for the generation of electricity. In both cases the objective is the maximum use of sugar cane biomass for electricity generation and commercialization. In addition, a set of initial elements that must be evaluated for an

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Angel Rubio, Email: arubio@uclv.edu.cu

adequate project of biomass-based electricity generation and commercialization is shown.

Key words: integration alternative; bioelectric; sugarcane biomass; cogeneration; energy schemes, electricity generation.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas y en particular en la actualidad, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible (Roque et al., 1998). En Cuba, recientemente, se ha aprobado un programa nacional para el incremento de la generación de electricidad con biomasa cañera, GEBC (2016). Los autores tuvieron una participación directa en la concepción de este programa.

A los efectos de estos estudios se entiende como biomasa cañera el bagazo o mezclas de bagazo con paja de caña. Este residuo agrícola cañero es empleado como combustible en Cuba desde hace años (Rubio y Pérez, 2000).

El máximo aprovechamiento de la biomasa cañera, con vista a la generación y comercialización de electricidad, tiene que encarar, entre otras, dos problemáticas específicas. La primera, abarca las alternativas de integración que se corresponden con diferentes esquemas de administración y propiedad de las partes integrantes del proyecto, a saber, la planta energética y la fábrica de azúcar como tal. La segunda, se corresponde con los esquemas energéticos para la propia planta energética. En los últimos años, en Cuba, a la planta energética, de los 25 ingenios que abarca el programa nacional, se ha dado en llamar bioeléctrica, este nombre será el empleado en este artículo.

Se persigue presentar, primeramente, un conjunto de elementos de partida imprescindibles para un adecuado proyecto de generación y comercialización de electricidad a base de biomasa cañera, y posteriormente, valorar varias alternativas de integración, dando una caracterización de cada una de ellas, así como, comparar dos esquemas energéticos para la generación de electricidad y calor.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio expuesto en este artículo resulta muy particular, no se trata de una investigación en sí misma, sino el resultado de la experiencia adquirida por los autores durante la confección del programa nacional para el incremento de la generación de electricidad con biomasa cañera de Cuba, el resultado de varios estudios realizados durante ese trabajo, así como, valoraciones de casos en otros países y criterios obtenidos mediante la consulta a varios expertos. Se trata pues de criterios consensuados y no de resultados de procesamientos estadísticos o investigaciones de laboratorio.

En la confección del programa nacional se valoraron los 56 ingenios del país y finalmente se seleccionaron 25 para instalar bioeléctricas en ellos. En el propio proceso de selección se fueron adoptando criterios evaluativos que conforman la esencia de lo que aquí se expone. La ubicación geográfica de los 25 seleccionados se muestra en la Figura 1.

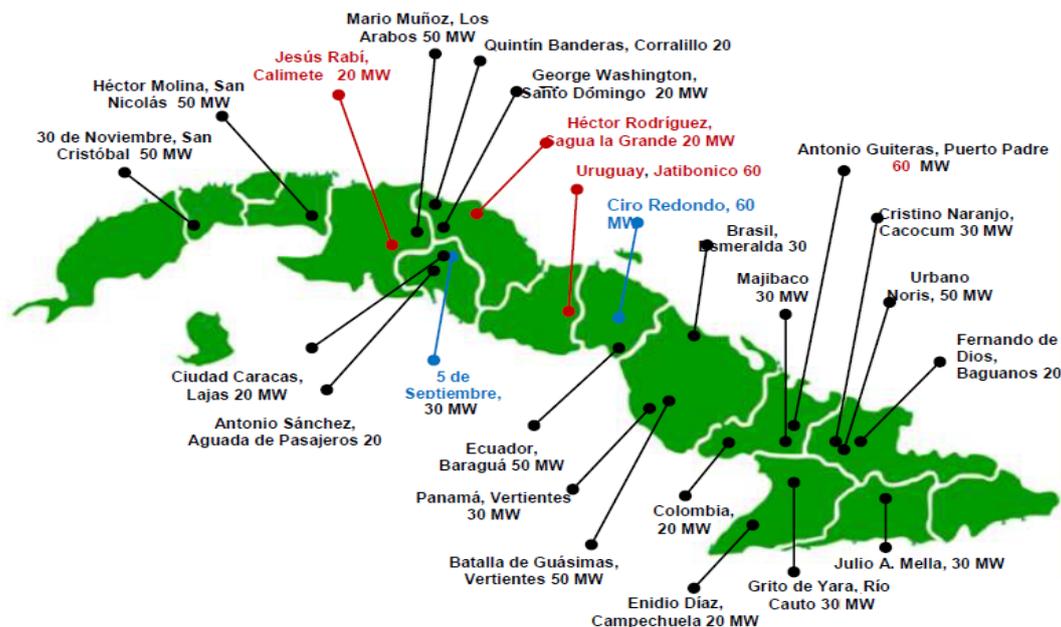


Figura 1. Ubicación geográfica y potencia en el programa nacional de las 25 bioeléctricas

El paso posterior fue el estudio de oportunidad de los priorizados y su oferta en una cartera de inversiones. En la Tabla 1 se muestran algunos datos de los tres proyectos ya en ejecución en la actualidad.

Tabla 1. Proyectos de bioeléctricas en ejecución

<i>Ingenio (Capacidad de molida, t/día)</i>	<i>Potencia real (MW)</i>	<i>La bioeléctrica pertenece a:</i>	<i>El ingenio pertenece a:</i>
Ciro Redondo (7 000)	62	Empresa Mixta Biopower	Empresa Azucarera Ciego de Ávila
Héctor Rodríguez (4 600)	20	Empresa Azucarera Villa Clara	Empresa Azucarera Villa Clara
Jesús Rabí (4 600)	20	Empresa Azucarera Matanzas	Empresa Azucarera Matanzas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Elementos de partida para un adecuado proyecto de generación y comercialización de electricidad a base de biomasa cañera

La concepción y desarrollo exitoso de un proyecto inversionista en la industria azucarera para la generación y comercialización de electricidad, demanda la valoración previa y la garantía de un conjunto de aspectos. En no pocos casos, su no consideración previa, ha conducido a proyectos insostenibles e incluso a fracasos. Entre los elementos que imprescindiblemente deberán considerarse están:

a) Contrato de compra-venta de electricidad

El aseguramiento de un acuerdo previo de compra-venta de la electricidad es el elemento número uno. Un estudio del mercado es decisivo. Los precios, adecuados

según país y región, para Cuba precios no inferiores a 0,14 USD/kWh. También es importante un acuerdo con período de tiempo suficiente para la recuperación de la inversión, para Cuba de 6 a 8 años como máximo, así como, una definición clara de las condiciones de entrega de la electricidad en cuanto a su calidad y otros requisitos.

b) Capacidad de molida del ingenio y grado de electrificación

Cuando los ingenios tienen una pequeña capacidad de molida, por un efecto de escala, la recuperación de la inversión resulta muy difícil y en ocasiones imposible. Lógicamente, este aspecto guarda relación con los precios de la electricidad. En Cuba, para precios de electricidad en el orden de los 0,15 USD/kWh y costos inversionistas de 2,25 MMUSD/MW instalado, los proyectos para ingenios de molida igual o menor de 4 500 tcaña/día resultan irrentables (Rubio-González y Rubio, 2016).

El grado de electrificación del ingenio resulta también importante, la mejor opción es tener la fábrica totalmente electrificada, lo que significa expandir todo el vapor a eficiencias mayores en las turbinas de labioeléctrica.

c) Producción de caña (disponibilidad de biomasa combustible)

La energía que se transformará en electricidad la obtiene la caña mediante la fotosíntesis. En la bioeléctrica solo se realizará un proceso de transformación de la energía potencial química -contenida en la biomasa- en electricidad y calor. Esto significa que la magnitud de la biomasa disponible, y por lo tanto de la energía, la decide la producción cañera y de hecho acota la magnitud de la factura a cobrar por venta de electricidad.

Estudios realizados para ingenios cubanos (Rubio-González y Rubio, 2016) demuestran que debería disponerse de caña para alcanzar zafras de, como mínimo, 150 días. Adicionalmente, en el programa cubano se han previsto varios ingenios que aportarán biomasa cañera a las bioeléctricas. Estos han sido denominados: tributarios. En ellos se ejecutarán inversiones para garantizar una cantidad de biomasa sobrante (Rubio-González y Rubio, 2016). El precio que se fije al bagazo deberá resultar estimulante para el tributario, el cual que tendría que rentabilizar inversiones para maximizar el bagazo sobrante. En varias bioeléctricas se empleará también marabú (*Dichrostachyscinerea*) como combustible complementario para incrementar el período anual de operación y reducir los plazos de recuperación de la inversión.

d) Disponibilidad de agua y espacio físico

La disponibilidad de agua para la condensación del vapor de la turbina de extracción-condensación como primera opción, antes de usar condensadores secos siempre más costosos (Camaraza et al., 2018), es muy importante, pero en Cuba la legislación del uso de las aguas terrestres pone en segundo plano la generación de electricidad por lo que un estudio muy serio de cada caso es imprescindible (Ley 124, 2017). La disponibilidad también de espacio físico para la instalación de la bioeléctrica y la distancia a zonas urbanas son muy importantes. Estos elementos pueden implicar un encarecimiento del proyecto por concepto de obras inducidas o empleo de tecnologías más costosas para la limpieza de gases.

e) Pasos básicos del proyecto

El proyecto inversionista reclama también un conjunto de pasos previos, tradicionales en este tipo de inversión, pero que en este caso están estrechamente vinculados con la producción de azúcar y algunos derivados. Los pasos más importantes son: estudio de oportunidad, estudio de pre-factibilidad y estudio de factibilidad (Decreto No 327, 2014). Para los estudios de pre-factibilidad, el desarrollo de una adecuada ingeniería básica resulta decisivo.

f) Condiciones de financiamiento

Las condiciones de financiamiento pueden ser decisivas para el éxito de un proyecto de estas características por definirse en ellas el valor y los períodos de los intereses a pagar. En todo caso deberá partirse de que se trata siempre de inversiones millonarias. En el caso de Cuba los proyectos más pequeños (20 MW) están en el orden de los 45 millones de USD como mínimo (Rubio-González y Rubio, 2016). La utilización de las capacidades nacionales de proyectos y suministros resultará clave para reducir costos. Dada la situación económica de Cuba, el financiamiento extranjero (en forma de inversión) resulta decisivo y en este caso el procedimiento está legislado mediante la Ley de Inversión Extranjera y el Reglamento Inversionista (Ley 118, 2014; Decreto No 327, 2014). A lo anterior se suma la alternativa de créditos al Estado cubano.

3.2. Alternativas de integración

a) Ingenio tradicional

En este caso la bioeléctrica y el ingenio pertenecen a la misma empresa. La bioeléctrica es de hecho la planta energética del ingenio. Esto permite una integración funcional directa entre producción de azúcar y generación de electricidad. Esta alternativa de integración ha sido la utilizada casi de manera generalizada en los proyectos en varios países, Rubio(2006). En Cuba, la mayor parte de las bioeléctricas previstas en el programa de desarrollo se operarán bajo esta modalidad. Ver ejemplo en Figura 2.



Hernández (2016)

Bioeléctrica. Ingenio Héctor Rodríguez



Hernández (2016)

Tributario. Ingenio Abel Santamaría

Figura 2. Ejemplo de bioeléctrica y su tributario en ingenio tradicional

b) Asociación ingenio y bioeléctrica

Esta asociación implica administraciones (empresas) independientes de cada parte. Se actuará bajo contrato para el intercambio de flujos, pues de hecho, la bioeléctrica actuará como una termoeléctrica con alto grado de independencia. La bioeléctrica le entregará electricidad y vapor al ingenio, y este le entregará su biomasa cañera y el condensado que recupere. La planta energética propia del ingenio se elimina.

En estas condiciones existen varias instalaciones en el mundo desde hace años, como es el caso de Bois-Rouge en Isla de la Reunión, Torres (1993). En Cuba, se operará en estas condiciones la bioeléctrica del ingenio Ciro Redondo (utilizando marabú como combustible complementario), según Lodos(2016), la bioeléctrica pertenecerá a la empresa mixta Biopower y el ingenio a la Empresa Azucarera de Ciego de Ávila. Ver Figura 3.



Torres (1993)

Bois-Rouge. Isla de la Reunión



Hernández(2016)

Ciro Redondo. Cuba

Figura 3. Ejemplos de asociación ingenio y bioeléctrica

c) *Termoeléctrica independiente de biomasa cañera*

En este caso varios ingenios entregan su biomasa cañera sobrante a una termoeléctrica que opera básicamente con este combustible. Cada ingenio mantiene su base energética, la que deberá ser mejorada mediante inversiones para maximizar el sobrante de bagazo, pero sobre todo deberá reducirse su consumo de vapor en el proceso, lo que es factible, Valdés (2015). En este caso el propósito de la planta energética del ingenio sería solo el autoabastecimiento lo cual se lograría con esquemas eficientes a baja presión.

Esta alternativa no se ha puesto en práctica aún, sin embargo resulta atractiva su valoración en aquellos casos en que existan varios ingenios de pequeña capacidad de molido en una misma zona geográfica, cuya inversión en una bioeléctrica no resulte rentable. Las ventajas de esta alternativa serían:

- ✓ Incrementar la generación eléctrica a partir de la biomasa sobrante (disponible), por encima de lo que se podría lograr con ella mediante una bioeléctrica en cada uno de los ingenios.
- ✓ Alcanzar una alta eficiencia por incremento de los parámetros del vapor hasta los máximos niveles actuales -técnica y económicamente permisibles- y la utilización de regeneración y recalentamiento en el ciclo termodinámico.
- ✓ Generar electricidad de forma independiente del proceso de producción de azúcar, lo que deviene en una ventaja sustancial por la facilidad operativa que brinda ante demandas de modificación de la entrega por el sistema consumidor de electricidad.

Se pueden apuntar como desventajas de esta alternativa que en la termoeléctrica no se tendría un ciclo con cogeneración, aunque pudiera existir, y que tendría que tener una ubicación logísticamente fundamentada y cumplir otros requisitos propios de una instalación de este tipo, como por ejemplo disponibilidad de agua para el condensador.

En las tres alternativas de integración expuestas, en aras de lograr un aumento de la generación eléctrica, pueden valorarse incrementos de la biomasa disponible mediante compra de residuos agrícolas cañeros a otros ingenios e incluso la utilización de otros combustibles complementarios (residuos forestales y urbanos o combustibles fósiles).

Esta adición de combustible permite mejorar sustancialmente la rentabilidad del proyecto por incremento del uso de la capacidad instalada (factor de capacidad).

3.3. Esquemas energéticos para bioeléctricas

3.3.1. Estudios necesarios

La definición del esquema energético a emplear en la bioeléctrica es un paso muy importante en este tipo de proyecto e implica estudios y decisiones en cuanto a:

3.3.1.1. Parámetros del vapor a emplear (presión y temperatura)

A mayores parámetros del vapor mayor eficiencia del sistema, pero hay límites por razones prácticas, tecnológicas e inversionistas (Rubio-González y Rubio, 2015). Se consideran como factores clave a valorar: costo de la inversión, del tratamiento de agua y de la automática, así como la posibilidad o no de empleo de los condensados vegetales para la alimentación de las calderas, entre otros. En el programa cubano se han previsto dos niveles: 6,7 MPa(67 bar) con 530 °C y 8,7 MPa(87 bar) con 540 °C.

3.3.1.2. Combustibles complementarios disponibles

La disponibilidad de combustibles es clave para la toma de decisiones, pues de ellos dependerá el tiempo de operación anual y el grado de explotación de la instalación (factor de capacidad). En casi todos los casos resulta imprescindible el uso de combustibles complementarios para alcanzar tiempos de operación no inferiores a 300 días en el año. El empleo de residuos agrícolas cañeros tiene limitaciones por su alto contenido de álcalis (Fernández et al., 2016) y la necesidad de preservar el suelo (Muñoz-Arboleda y Quintero-Durán, 2011). El empleo de combustibles, sobre todo fósiles, pudiera encarecer el sistema de limpieza de gases.

3.3.1.3. Tipo de caldera y horno

En aras de una alta eficiencia (no menor de 90 %) no hay dudas en cuanto a la necesidad de emplear calderas modernas, con horno totalmente apantallado, superficie convectiva moderada, economizador, calentador de aire y uno o dos domos como máximo. Valorar el tipo de horno a emplear es un aspecto también de sumo interés, no todas las biomásas cañeras presentan iguales características (sobre todo por diferencias en humedad, granulometría y contenido y tipos de cenizas) y además, el posible empleo de otros combustibles está presente. Los hornos de parrilla *pin hole* y viajera se destacan como los prioritarios, aunque los de lecho fluidizado burbujeante resultan valorables.

3.3.1.4. Tecnologías para reducción de los consumos de vapor

La reducción del consumo de vapor en el proceso de fabricación de azúcar (evaporadores peliculares, tachos continuos, etc.) tiene un impacto directo y alto en el incremento de la electricidad generada y de hecho comercializada, Awasthi (2011) y Valdés (2015). Esto impacta en los parámetros de las calderas y turbinas del esquema energético. La aspiración de la industria azucarera cubana es reducirlo a 400 kgvapor/tcaña, GEBC (2016).

3.3.1.5. Ingenios con refinerías y destilerías y otros usos del vapor de escape

La presencia en el ingenio de sistemas consumidores de vapor de escape para producciones de derivados incrementa la cogeneración y mejora la rentabilidad del proyecto global. En los estudios inversionistas la selección de ingenios con este tipo de instalación, o la decisión de inversiones adicionales para tenerlas, debe tener alta prioridad. La presencia de estos consumidores influye significativamente en las características de los equipos del esquema energético. En este caso es importante el estudio del modelo de negocio a establecer en el caso de un tercer actor a cargo de la bioeléctrica para que no se vea afectada su economía por reducción de la generación de electricidad.

3.3.1.6. Regeneración

La regeneración (calentamiento regenerativo del agua de alimentación de la caldera con extracciones de vapor de la turbina) para incrementar la eficiencia del ciclo termodinámico, entre 2 y 6 puntos porcentuales (Rubio y Rojas, 2017), es una técnica constituida desde hace muchas décadas y empleada sin excepción en las termoeléctricas. En la industria azucarera cubana solo se aplica mediante el calentador-desaerador y conceptualmente es casi desconocida. Su introducción es totalmente factible y necesaria (Rubio y Rojas, 2017).

3.3.1.7. Optimización de la potencia a instalar

La optimización de la potencia a instalar (empleo de la potencia mínima que permita obtener el vapor de escape suficiente para el proceso de producción de azúcar y otros subproductos) es decisiva para la reducción del costo inversionista y mejorar la rentabilidad de la inversión. Muchos de estos proyectos no se hacen para trabajar todo el año, en el programa cubano se estiman períodos de operación de alrededor de los 300 días. Esto significa que la bioeléctrica operará en zafra (cogenerando) unos 150 días y fuera de zafra (condensando sin cogenerar) otros 150 días. Durante la limpieza del ingenio operará también condensando. La potencia a instalar deberá ser tal que permita ahorrar biomasa durante la zafra para operar después de ella y maximizar el factor de capacidad de la bioeléctrica. El factor de capacidad (calculado por los autores en estudios de oportunidad y utilizando solo la biomasa cañera del ingenio) es bajo, estando en el orden del 50 %.

De instalarse una potencia superior a la óptima (mínima necesaria) la bioeléctrica generará la misma cantidad de energía en el año, pero en menor tiempo de operación. Los ingresos económicos serían los mismos, pero el costo inversionista muy superior y aumentaría el período de recuperación de la inversión.

Lógicamente, en la definición de la potencia tendrá un efecto significativo (pudiendo incrementarla) la decisión de empleo de combustibles complementarios y la disponibilidad de biomasa de los tributarios.

3.3.1.8. Logística del suministro de combustible

La logística del suministro de los combustibles complementarios deberá ser también atendida prioritariamente. La biomasa por lo general es un combustible de bajo calor específico de combustión (kJ/kg), de baja densidad de bulto (kg/m³) y de baja densidad

energética superficial (kJ/m^2). Estas características encarecen su transportación y obligan en ocasiones a su densificación, lo que exige valoraciones (Fernández et al., 2016).

3.3.1.9. Cumplimiento de normativas medioambientales

Las normativas medioambientales (más exigentes para las nuevas instalaciones que para las existentes) imponen el cumplimiento de parámetros que conllevan inversiones adicionales, sobre todo para reducir la emisión de particulados y de NO_x (Misplon et al., 2018). Esto implica valoraciones tecnológicas como separación con sistemas húmedos, ciclones y filtros electrostáticos y también la introducción del escalonamiento del aire (barreras de aire frío) en el horno, lo que incrementa los costos inversionistas.

3.3.2. Alternativas de esquemas energéticos para la bioeléctrica

Partiendo de que la generación de electricidad se hará en un ciclo termodinámico Rankine, la reducción del número de calderas es un hecho aceptado universalmente como ventajoso. Esto conduce a esquemas de una o dos calderas como máximo. Por otro lado, en este caso que la generación eléctrica está asociada a una planta de proceso -que requiere vapor saturado de bajos parámetros- resulta obligatoria la presencia de turbinas de contrapresión o de extracción-condensación. Esto conduce obligatoriamente a solo dos esquemas posibles para generar electricidad en y fuera de zafra. Seguidamente mostrará cada esquema y se apuntarán para cada uno sus ventajas, las que constituyen desventajas del otro.

3.3.2.1. Dos calderas y dos turbinas (contrapresión y extracción-condensación). Ver Figura 4.

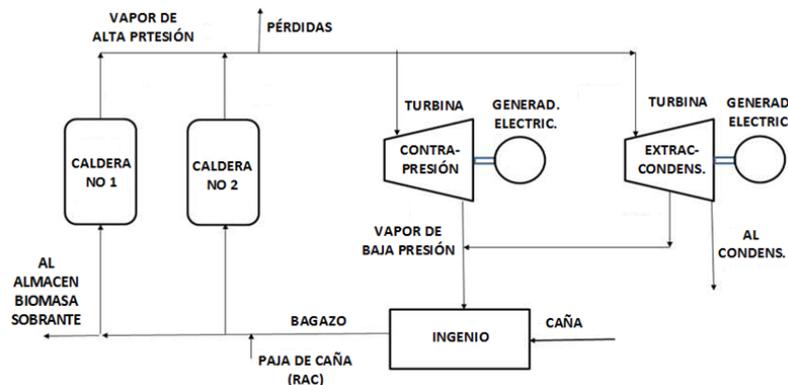


Figura 4. Esquema de dos calderas y dos turbinas

Ventajas:

- ✓ Ante la rotura de la turbina de extracción-condensación, el ingenio podría operar completando la demanda de vapor con una reductora-atemperadora de ser necesario
- ✓ Ante la rotura de una caldera el ingenio podría operar con una sola caldera, aunque a molida reducida.

3.3.2.2. *Una caldera y una turbina de extracción condensación. Ver Figura 5.*

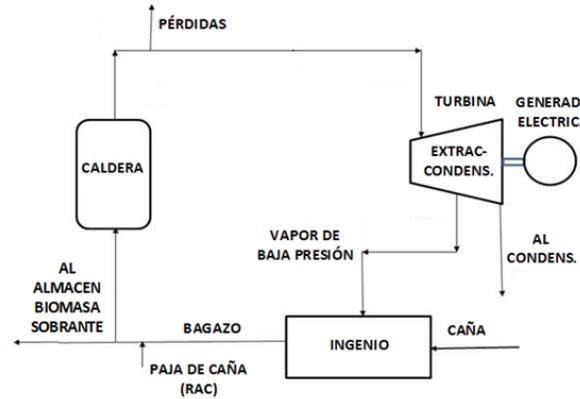


Figura 5. Esquema de una caldera con una turbina

Ventajas:

- ✓ Menor costo inversionista por: permitir instalar una potencia óptima menor que en el primer esquema, menor costo en calderas, turbinas y generadores eléctricos, no duplicarse la automática, el sistema de interconexión eléctrica ni el sistema de tuberías y simplificación de la cimentación y construcción civil (menor área de suelo y área techada).
- ✓ Mayor eficiencia (menor consumo específico de vapor) al tener una turbina de mayor potencia que cada una de las del primer esquema.
- ✓ Facilidad para la introducción de la regeneración en el esquema termodinámico.
- ✓ Mayor fiabilidad y menores costos de operación y mantenimiento por menor número de equipos.

Una variante de este esquema sería una turbina de dos cuerpos con el generador instalado entre ellos. Un desacople entre el generador y el cilindro de baja presión (condensación) permitiría que en zafra este último no trabajara. En consecuencia se podría instalar una caldera y un generador de menor capacidad obteniéndose un mayor ahorro de biomasa en zafra y un incremento del factor de capacidad de la instalación. Estas turbinas están disponibles en el mercado, Siemens (2016).

Teniendo en cuenta que en la actualidad las calderas y las turbinas se fabrican con una alta fiabilidad, las ventajas del primero se reducen sustancialmente; por otro lado, ante la rotura de la turbina de contrapresión en el primer esquema tampoco existiría solución operativa para seguir moliendo.

3.3.2.3. *Alternativas complementarias en los esquemas energéticos*

Se ha identificado como aspecto medular para el logro de este tipo de proyecto inversionista el incremento del tiempo de operación anual de la bioeléctrica. Hasta el presente la solución encontrada ha sido el empleo de combustibles complementarios, la cual es muy correcta, sin embargo existe otra posible vía aun poco valorada y que amerita investigación, se trata del uso de la energía solar térmica integrada al ciclo termodinámico de la bioeléctrica, para la generación de vapor o el calentamiento del agua de alimentación a la caldera, (Konrad et al., 2015). Mientras que otros esquemas alternativos y que merecen estudios son: ciclo combinado con turbina de gas a partir de la gasificación por tratamiento térmico o biológico de la biomasa cañera, la cachaza y

los mostos de destilería y ciclo combinado con turbina de gas y uso del alcohol etílico como combustible de la turbina.

4. CONCLUSIONES

1. Se ha identificado un conjunto de elementos de partida para un adecuado proyecto de generación y comercialización de electricidad a base de biomasa cañera, cuya valoración previa resulta imprescindible. Los principales son: acuerdo de compra-venta de electricidad, capacidad de molienda del ingenio y producción cañera.
2. Existen, al menos, tres alternativas de integración de los ingenios que se corresponden con diferentes esquemas de administración y propiedad de las partes integrantes del proyecto, que permiten alcanzar altos niveles de empleo del potencial existente de generación de electricidad con biomasa cañera. Estas son: ingenio tradicional, asociación ingenio y bioeléctrica y termoeléctrica independiente.
3. La definición del esquema energético a emplear en una bioeléctrica implica estudios y decisiones en cuanto a: parámetros del vapor, combustibles complementarios y su logística, tipos y número de calderas y turbogeneradores, tipo de horno, tecnologías para reducción de los consumos de vapor en el proceso, ingenios con refinerías y destilerías, así como, otros usos del vapor de escape, regeneración, optimización de la potencia y normativas medioambientales.
4. Se reconocen, como principales, dos esquemas energéticos para la generación y comercialización de electricidad a partir de biomasa cañera empleando el ciclo Rankine. Estas son: dos calderas y dos turbinas (contrapresión y extracción-condensación) y una caldera y una turbina de extracción condensación; ambos son válidos, pero el segundo esquema presenta mayores ventajas que el primero.

REFERENCIAS

- Awasthi, S., Integrated sugar complex with minimum energy consumption and maximum cogeneration - concept to commissioning., *International Sugar Journal*, Vol. 113, No. 1353, 2011, pp. 54-59.
- Camaraza, Y., Cruz, O M, García, O.F., Predicción de la salida de una turbina acoplada a un condensador de vapor refrigerado por aire, *Centro Azúcar*, Vol. 45, No. 1, 2018, pp. 50-61.
- Decreto No 327 de 2014., Reglamento del proceso inversionista., *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, Gaceta Oficial No 5 Extraordinaria 23 de enero 2015, pp. 27-59.
- Fernández, J., Pérez, J., y Sabadí, R., Los combustibles para las Bioeléctricas: bagazo, RAC, caña alta fibra, marabú, otras biomásas conferencia dictada durante la I Conferencia Internacional Energía e Innovación para el Desarrollo Sostenible en el marco de la I Convención de Ciencia, Tecnología e Innovación del CITMA, Palacio de Convenciones, La Habana, 1-3 de noviembre de 2016.
- GEBC (Grupo Estatal de Biomasa Cañera). Incremento de generación con biomasa cañera., Documento interno de AZCUBA, mayo 2016, pp. 1-21.
- Hernández, B., Tecnología y equipamiento para la producción de energía eléctrica en fábricas de azúcar., Conferencia dictada durante la I Conferencia Internacional

- Energía e Innovación para el Desarrollo Sostenible en el marco de la I Convención de Ciencia, Tecnología e Innovación del CITMA, Palacio de Convenciones, La Habana, 1-3 de noviembre de 2016.
- Konrad E., Buranello, L., Lo Giudice, P., Vogel, T., Gorner, K. and Bazzo, E., Boosting power output of a sugar cane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feed water heating scheme., *Applied Energy*, Vol. 154, No. 15, 2015, pp. 232-241.
- Ley 118 de 2014., Ley de inversión extranjera., Gaceta Oficial de la República de Cuba, Gaceta Oficial No. 20 Extraordinaria de 16 de abril de 2014, pp. 177-189.
- Ley 124 de 2017., Ley de las aguas terrestres., Gaceta Oficial de la República de Cuba, Gaceta Oficial No 51 Extraordinaria de 16 de noviembre de 2017, pp. 985-1015.
- Lodos, J., Sobre la ingeniería conceptual y básica de la bioeléctrica del central Ciro Redondo. Comunicación personal a los autores, Vía electrónica, 15 febrero 2016.
- Misplon, B., De Villiers, E., e Ikson, M., EPA challenges for bagasse fired power station., <http://www.thermalenergysystems.com/issct10.pdf> (24 de mayo 2018).
- Muñoz-Arboleda, F., y Quintero-Durán, R., Trash management after green cane harvesting and its effect on productivity and soil respiration., *International Sugar Journal*, Vol. 113. No. 1356, noviembre 2011, pp. 32-36.
- Roque, P., Rubio, A., Pérez. B., y Ponce, F., Hacia una industria sucroenergética cubana., *International Sugar Journal*, Vol. 100, No. 1199, 1998, pp. 532-536.
- Rubio, A., Pérez, F., Actualidad del empleo como combustible de los residuos agrícolas cañeros en Cuba., *International Sugar Journal*, Vol. 102, No. 1219, julio 2000, pp. 367-372.
- Rubio, A., Estado del arte en la cogeneración de electricidad en la industria de la caña de azúcar. Primeros pasos hacia una industria sucroenergética., *Centro Azúcar*, Vol. 33, No. 2, 2006, pp. 42-51.
- Rubio-González, A., y Rubio, M., Estudio económico y consideraciones técnicas sobre la conveniencia del empleo de presión de vapor de 67 o 100 bar para la construcción de Bioeléctricas en Cuba., Documento interno de AZCUBA 2015, pp. 1-5.
- Rubio-González, A., y Rubio, M., Evaluación de alternativas para el máximo aprovechamiento del potencial energético de la biomasa cañera con vista a la producción de electricidad., Documento interno de AZCUBA, abril 2016, pp. 1-16.
- Rubio, M., y Rojas, D., Optimización de ciclos de cogeneración., Memorias del I Taller del Proyecto: Evaluación de alternativas para el desarrollo energético sostenible de la Empresa Azucarera de Villa Clara, Documento Interno del Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Santa Clara, abril 2017, pp. 15-28.
- Siemens, SST-700 industrial steam turbines. Answers for energy., http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/SST-700/downloads/SST_700%20brochure_EN.pdf, (18 de octubre 2016) pp. 1-4.
- Torres, J., Informe de la reunión con delegación francesa de la Compañía Térmica de Bois-Rouge. Documento interno del Ministerio del Azúcar de Cuba, 11 al 16 de diciembre de 1993, pp. 1-15.
- Valdés, A., Uso eficiente del vapor en el proceso de producción de azúcar crudo o blanco directo., *ATAC*, Vol. 76, No. 2, 2015, pp. 34-38.