Prospectiva tecnológica para el empleo sustentable de la biomasa de la caña de azúcar en las bioeléctricas durante y después de zafra

Antonio Aguilar-Pardo[1]*, Juan Fernández-Rodríguez [1], Dagney Aguilar-Estrada[2], Yaneisy Díaz-Jiménez[1]

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).
   Via Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.
   *antonio.aguilar@icidcamy.azcuba.cu
2. Grupo Empresarial Agropecuario y Forestal Artemisa. Carretera Waterloo, Finca La Esperanza, Artemisa. Cuba.

RESUMEN

En este trabajo se hace un análisis tecnológico prospectivo para el abastecimiento de una bioeléctrica, con biomasa de la caña de azúcar durante la zafra azucarera y después de la zafra; partiendo de la selección de una ruta tecnológica que tiene en cuenta la cosecha integral de la caña, el uso racional de los medios de transporte, el incremento de valor agregado de los productos de la cosecha centralizado en la industria, la eficiencia en la producción de azúcar y el uso energético de la biomasa que se produce en el cultivo de la caña; así como las instalaciones con la logística para el funcionamiento. En zafras con períodos de duración de 150 y 180 días, es posible potencialmente operar la bioeléctrica durante 96 y 116 días, una vez terminada la zafra y obtener períodos de cogeneración anual de 246 y 296 días respectivamente, con entregas importantes de energía eléctrica a la red nacional; mientras con la ruta convencional la biomasa disponible solo alcanza para cogenerar en el período de zafra.

Palabras clave: biomasa cañera, bioeléctricas, prospectiva tecnológica, cogeneración.

ABSTRACT

In this work a prospective technological analysis is made for the supply of a bioelectrical, with biomass of sugarcane during the sugar harvest and after harvest; leaving of the selection of a technological route that keeps in mind the integral crop of the cane, the rational use of the means of transport, the increment of added value of the products of the crop centralized in the industry, the efficiency in the production of sugar and the energy use of the biomass that takes place in the cultivation of the cane; as well as the facilities with the logistics for the operation. In harvests with periods of duration of 150 and 180 days, it is possible potentially to operate the bioelectrical during 96 and 116 days, once finished the harvest for periods of annual cogeneration of 246 and 296 days respectively, with important deliveries of electric power to the National Net; while with the conventional route the alone available biomass reaches to cogenerate in the period of harvest.

Key words: biomass of sugarcane, bioelectrical, prospective technological, cogeneration.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, cuando la demanda de energía ha marcado profundas crisis, unido a la influencia que el sector energético ejerce sobre el medio ambiente, agravado por el uso indiscriminado de los combustibles fósiles; el desarrollo tecnológico está orientado a la obtención y aplicación de nuevas fuentes de energía renovable (FER), como la eólica, la solar, la hidráulica y la biomasa, entre otras. Se ha reconocido también, que entre las FER la energía procedente de la biomasa tiene mayores posibilidades por su potencialidad, distribución territorial, carácter renovable y amigable con el medio ambiente (1 - 6).

Por su naturaleza, la biomasa tiene una baja densidad relativa de energía; se requiere su disponibilidad en grandes volúmenes para producir potencia, en comparación con los combustibles fósiles, por lo que el transporte y manejo se encarecen y se reduce la producción neta de energía. La clave para este problema está en ubicar el proceso de conversión cerca de las fuentes de producción de biomasa,

como aserraderos, ingenios azucareros y granjas agropecuarias, donde están presentes los desechos de aserrío, el bagazo de caña, los residuos agrícolas de la cosecha (RAC) y las excretas de animales, entre otras.

La producción y obtención de biomasa procedente de cultivos y explotación de montes, son actividades que se mecanizan todo lo posible para reducir costos y aumentar la productividad.

La naturaleza de la biomasa, requiere de una serie de transformaciones para ser objeto de un aprovechamiento energético eficiente; al margen de su bajo poder calorífico, es conveniente que los combustibles procedentes de la biomasa tengan propiedades como: homogeneidad, uniformidad de las partículas, alta densidad volumétrica, baja humedad relativa y esten exentos de contaminantes; de manera que ofrezcan mayores facilidades de manejo, almacenamiento y transporte; lo cual exige una adecuada selección y utilización de los procesos y equipos mecánicos desarrollados inicialmente para las explotaciones agrarias, donde se ha alcanzado un alto nivel de desarrollo en los últimos años (7 - 12).

Las perspectivas de evolución de este tipo de energía a corto plazo son muy buenas, la Comisión Europea ha fijado escenarios para alcanzar las metas fijadas para el año 2020, donde el consumo anual de biomasa para obtener calor y energía eléctrica llegaría a 1 650 TWh, de las 800 TWh en el 2007.

En el año 2012, la producción de energía primaria con biocombustibles sólidos en Europa alcanzó 82.3 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), superando el valor de 78.2 Mtep de 2011 y los 80.6 Mtep de 2010. En cuanto a España se mantiene en sexta posición en producción entre los países europeos, con alrededor de 5 Mtep de producción de energía en 2012. Es de destacar el caso de Alemania, uno de los países más avanzados en producción y consumo de biomasa junto a Francia; la evolución de instalaciones de calderas de pellets ha sido exponencial desde el año 2006, sumando más de medio millón de calderas instaladas entre el año 2006 y 2010 (13 - 17).

El uso de la biomasa en los últimos años, se ha incrementado también, con el desarrollo de instalaciones de alta capacidad en la producción de energía eléctrica, como; la planta bioelétrica Ironbridge, la mayor del mundo, con 740 mW, desarrollada en el Reino Unido y puesta en funcionamiento en el año 2013 a base de pellets de madera; en Finlandia funcionan siete plantas con capacidad entre 125 y 265 mW; como en Polonia y Estados Unidos donde también funcionan sendas bioeléctricas, en este rango de capacidad (18 - 20).

La caña de azúcar es un cultivo de alta producción de biomasa por unidad de área, con posibilidades de disminuir el déficit actual de energía, materias primas y deterioro del medio ambiente; de asumir el reto de la cosecha mecanizada de la caña integral verde, al aplicar los resultados alcanzados en el desarrollo tecnológico sobre el aprovechamiento de la masa vegetal. En Cuba, la fuente principal de energía es el petróleo, seguida por las FER, fundamentalmente la biomasa de la caña de azúcar, la cual puede ser casi el doble, si se considera el potencial de RAC excedente en el campo y en las instalaciones de limpieza de la caña; prioridad estratégica en el programa de desarrollo energético del sector, con proyectos de instalación de bioeléctricas en las fábricas de azúcar con capacidades de generación entre 20 y 60 megavatios (21, 22). En el presente trabajo se realiza un análisis tecnológico prospectivo de abastecimiento energético a una bioeléctrica asociada a la industria azucarera, con biomasa cañera durante y después de la campaña azucarera.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se realizó un balance de masa y energía, en un sistema de cosecha de la caña verde integral que considera el aprovechamiento energético de los RAC con la aplicación de una ruta tecnológica de alta eficiencia y un análisis prospectivo tecnológico para la manipulación, la preparación, el almacenamiento y la alimentación de la biomasa cañera preparada a la bioeléctrica, durante y después de zafra.

Análisis prospectivo

En estudios de diferentes rutas tecnológicas (RT) para la obtención y el manejo de la biomasa (23, 24), especialmente de tres modelos significativos de cosecha integral de caña verde, donde se recoge toda la masa vegetal asociada a la planta (tallo, cogollo, hojas verdes y secas); se concluye que:

1. Las rutas tecnológicas objeto de estudio en la cosecha integral de la caña dan la posibilidad del uso de toda la masa vegetal que se produce en el cultivo de la caña de azúcar, con particularidades específicas.
2. Entre las rutas tecnológicas estudiadas existen diferencias significativas que deben tenerse en cuenta en su selección; en la primera, (RT1) se obtiene un 40 % más de bagazo, con menor número de equipos y operaciones, a la vez que disminuye la eficiencia en el proceso de extracción de jugos; mayores pérdidas de pol en bagazo y menor pureza en el jugo mezclado. Las rutas 2 y 3 mantienen la eficiencia en la industria y se aprovecha una cantidad similar de biomasa (RAC preparado + bagazo). Para ello la RT2 incluye instalación multipropósito en la industria; mientras la RT3 emplea equipos y maquinaria adicional, para la recolección y densificación de los RAC en el campo.
3. La RT2 puede ofrecer mejores resultados, por sus características; uso racional de los medios de transporte, incremento de valor agregado de los productos de la cosecha centralizado en la industria, alta eficiencia industrial en la producción de azúcar y el uso del potencial de biomasa que se produce en el cultivo de la caña.

Principales aspectos con impacto en la eficacia y el costo de las instalaciones

En la concepción de las rutas tecnológicas objeto de estudio, se han tenido en cuenta las operaciones imprescindibles que facilitan el uso eficiente de los RAC mezclados con el bagazo, mediante métodos termoquímicos.

Por la procedencia natural de los RAC, el estudio de su aprovechamiento está asociado a la cosecha de la caña, como subproducto de la campaña; esto da posibilidades a la integración de operaciones agrícolas e industriales, sin afectación de la calidad de la caña molible como materia prima en la producción de azúcar; así como a la obtención de RAC con tamaño de partículas similares a las del bagazo, para el uso de este recurso, sin inversiones significativas adicionales en equipos e instalaciones.

Entre las diferencias significativas que pueden observarse en las rutas tecnológicas objeto de estudio, está el transporte de RAC junto con la caña (RT1 y RT2), lo cual es significativo en el uso energético de este recurso aun cuando implica un incremento de alrededor de 7 % en la capacidad de transporte.

En las rutas estudiadas, solo en la RT3, tomada como referencia, la caña molible es transportada de forma tradicional (independiente de los RAC) y se realizan nueve operaciones; mientras en el resto de las rutas tecnológicas 1 y 2, donde la caña es transportada junto con los RAC, se realizan 5 y 6 operaciones, respectivamente, que incluyen también el uso de RAC. Esto aporta ventajas importantes, por su influencia en los costos de inversión y operación del sistema; en lo adelante el presente estudio expondrá la ruta tecnológica 2, (RT2).

Descripción de la ruta tecnológica 2

Esta ruta cumple con las operaciones de corte y carga mecanizada de la caña integral, transporte de la caña integral al central, limpieza de la caña y preparación de RAC, molida de caña limpia y mezcla de RAC preparado con bagazo.

Se emplea una máquina cosechadora del tipo B que realiza el corte de la planta en la parte inferior, la troza y descarga toda la masa vegetal (tallos, hojas verdes y secas y el cogollo) sobre el medio de transporte. La caña cosechada es transportada al central, donde se incrementa el valor agregado de los productos de la cosecha (caña y RAC), con la limpieza de la caña y la trituración de los RAC, en una instalación multipropósito (I.M) con alta eficiencia de limpieza, dotada con equipos preparadores de RAC. La caña limpia es enviada al tándem de molinos; mientras los RAC preparados se mezclan con el bagazo procedente del último molino para el uso como combustible. La RT2 cumple con el flujo tecnológico, según la figura. 1

CARACTERÍSTICAS Y POTENCIAL DE BIOMASA CAÑERA

Características energéticas

Las características energéticas de la biomasa cañera han sido objeto de estudio en varias ocasiones y diferentes autores. De estudios recientes, están entre otros, la composición estructural y química así como el análisis inmediato de la biomasa cañera y el marabú, este último por sus posibilidades como combustible en Cuba; como aparece en las tablas 1 y 2, respectivamente (25).

El estudio concluye que el bagazo y los RAC presentan mayor contenido de volátiles, resultando combustibles adecuados por su valor calórico. El contenido de azufre, cloro y sales de compuestos metálicos en los RAC, es superior que en el marabú y el bagazo, lo cual está asociado con las características de las cenizas, pudiendo producir incrustaciones y corrosión en la caldera, por lo que su inclusión en las mezclas de biomasa debe ser considerado. El bagazo es la biomasa más segura y efectiva, por su disponibilidad y accesibilidad, mientras que los RAC y el marabú, están más afectados por las condiciones de recolección, transporte y manejo, resultando factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación de la bioeléctrica. El marabú constituye la fuente de biomasa no cañera con un mayor potencial energético para su uso inmediato en Cuba.

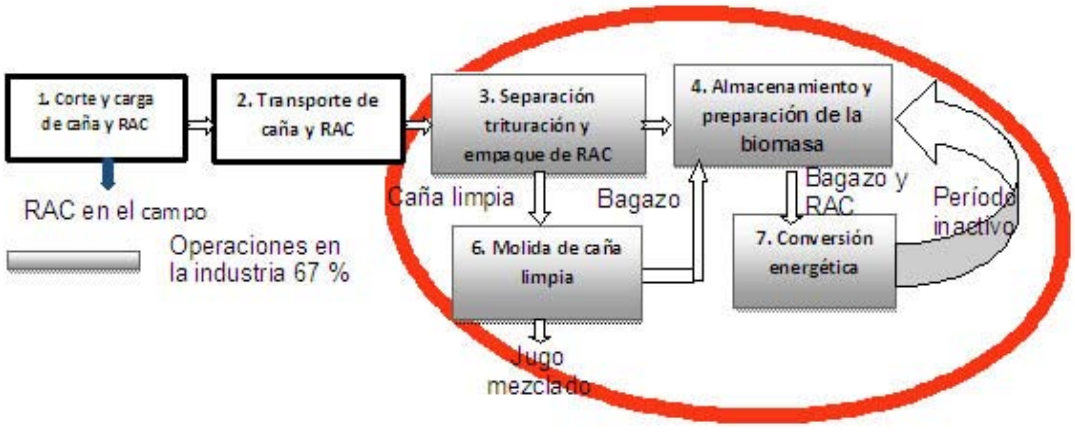

Figura 1. Flujo tecnológico con las operaciones requeridas para el aprovechamiento de los RAC en la RT2.

Valor calórico inferior de la biomasa cañera

El valor calórico inferior (VCI) de la biomasa cañera a los efectos del balance de energía en la caldera puede ser determinado con la aplicación de la ecuación (1) desarrollada por E. Hugot y los valores de las tablas anteriores, entre otros reportados en la literatura (26 - 28).

Tabla 1. Composición estructural y química de la biomasa para las bioeléctricas

Análisis (%)	RAC	Bagazo	Marabú	Análisis %	RAC	Bagazo	Marabú
C	41.4	46.2	48.5	Celulosa	45.13	46.60	47.5
H	5.1	6.10	5.12	Lignina	14.11	22.50	22.6
S	0.15	0.07	0.8	Hemicelulosa	29.5	25.10	25.4
N	0.53	0.32	1.1	* Solubilidad	13.35	4.11	13.2
O	44.3	44.71	43.08	Extractivos	3.54	2.8	3.0
Cl	0.4	0.12	0.05	Cenizas	8.02	2.60	1.7
Cenizas	8.02	2,60	1.7				

*solubilidad en agua caliente.

Tabla 2. Análisis inmediato de la biomasa cañera y el marabú

Biomasas	Análisis inmediato (%)				
	Volátiles	Carbón fijo	Cenizas	Humedad	PCS, (kJ/kg)
RAC	84.2	6.6	9.2	70-20	14620
Bagazo	88.6	8.8	2.6	48-52	16722
Marabú	75.5	22.5	1.7	60-50	19800

PCI = PCS* (1-w) - 2442* [9*H* (1 - Cza)*(1 - w) + w];[kJ/kg] (Ecu. 1)

Donde:
PCS = poder calorífico superior en base seca; [kJ/kg de combustible seco].
PCI = poder calorífico inferior en base húmeda (b.h); [kJ/kg de combustible].
w = contenido de agua del combustible; [kg agua/kg combustible].
H = contenido de hidrógeno en la materia seca libre de ceniza; [kg H_2/kg de combustible seco libre de ceniza].
Cza = contenido de ceniza de la materia seca; [kg de ceniza/kg de combustible seco].

Características físicas

La incorporación al proceso industrial de los RAC procedentes del campo e instalaciones de limpieza de la caña requiere de la recolección, el transporte y previa preparación debido a su heterogeneidad, baja densidad de bulto (20-30 kg/m^3), tamaño de las partículas (200-700 mm), alto contenido de humedad (40-60 %) y por la gran cantidad de tierra que incorporan las operaciones de recolección, cuando no son bien elegidas.

Con la aplicación de la ruta tecnológica 2 (RT2) que incluye instalaciones para limpieza de la caña, la operación más importante está asociada a la reducción del tamaño de las partículas, debido a la alta eficiencia que se requiere alcanzar en esta operación, para el empleo directo como combustible o materia prima en la industria. Otra operación importante para el uso de los RAC, es la densificación de la biomasa, ante las necesidades de almacenamiento.

La exigencia en la preparación de los RAC depende de la aplicación previamente elegida y de los requerimientos del proceso. Si se trata del uso como combustible y la combustión es por el método con frente de llama, sería necesario pulverizar los RAC y alcanzar una humedad cercana a la del equilibrio del material con el medio ambiente. Mientras que cuando el método es en pila o en semisuspención, como es el caso de la combustión del bagazo, generalmente en la industria azucarera, los requerimientos de los RAC (29) para el proceso pueden ser los siguientes:

- Tamaño de partícula, ≤ 50 mm (clase - 11,6 mm).
- Contenido de humedad, 25 ± 5 %.
- Contenido de ceniza, 8 ± 2 %.
- Densidad aparente, 45 ± 5 %.
- Valor calórico neto, 2284 Kcal/kg.
- Relación fuel oíl/RAC, 4.38.

Potencial de biomasa en la cosecha

Para el balance de labiomasa entre la cosecha y la industria se dispone de la información siguiente:
a).En la industria:
Caña molida; 4500 t/d.
Materia extraña en caña molible; 5.0 %.
Bagazo % caña; 30.
b) En el campo:
Rendimiento en caña limpia; 60 t/ha.
Eficiencia de limpieza de la caña; 79, (21 y 58 %).

Del balance de masa, considerando los parámetros anteriores; se obtiene la tabla 3, donde se puede observar, la cantidad de RAC que se produce en el cultivo de la caña, su distribución durante la cosecha y las posibilidades de recuperar hasta el 79 % de los residuos agrícolas. Inicialmente, quedan en el campo 21 % de RAC como cobertura de los suelos. Mientras se recupera el 58 % para el empleo como fuente de energía en la bioeléctrica asociada a la industria, siguiendo la RT2: Caña integral directamente a la instalación multipropósito (IM) de donde

Tabla 3. Distribución y recuperación de los RAC en la cosecha integral de la caña

	Campo		I. L.C		Industria		Total recuperado	
t/ha	3,4	21 %	9.2	58 %	3.4	21 %	12.6	79 %
t/d	241		653		241		894	

I.L.C. = índice de limpieza de la caña

Tabla 4. Potencial de biomasa en la cosecha integral de caña verde; t/día

Tecnología	En el campo		En la industria				Biomasa	
	Cobertura	Recup.	RAC	Caña	Bagazo	Total	Disponible	Recup. %
0	1	2	3	4	5	6	7	8
RT2	241	653	241	4500	1350	2244	2003	89
Convenc.	894	0	241	4500	1350	1350	1350	60

salen RAC triturados, directamente a la caldera y/o empacado hacia el almacén de biomasa y caña limpia directamente al basculador, respectivamente.

Con la aplicación de estos resultados y considerando el bagazo que se produce en la industria se obtiene la información que aarece en la tabla 4, donde se ilustra la distribución de la biomasa producida entre la cosecha y la industria en el central azucarero Jesús Rabí, provincia de Matanzas, insertado en el programa de desarrollo e instalación de bioeléctricas en Cuba, con capacidad de 4500 t/d de caña molible.

Como se puede observar, el potencial de biomasa disponible es 2003 t/d; 48 % mayor con relación a la tecnología convencional (1350 t/d).

Cuando se mezclan ambos combustibles, los RAC representan el 33 %, lo cual exige un riguroso control en las operaciones de recolección y preparación de los RAC en aras de obtener mayor uniformidad de la biomasa y menor cantidad de ceniza en el combustible.

Balance de energía

- Capacidad de la caldera, 110 t/d.
- Eficiencia, 85.0 %.
- Características del vapor: temperatura 485 °C; presión 6.4 Mp; entalpía 825.9 Kcal/kg.
- Características del combustible:

  Bagazo; humedad 50.0 %; VCI 1861Kcal/kg, Cza 2.6

  RAC; humedad 35.0 %, VCI 2595Kcal/kg, Cza 9.2 %.

  Mezcla combustible; RAC 33 %; Hum. 44.9 %; Ceniza 4.78 % y VCI 2103 Kcal/kg.

Del balance de energía en la caldera se obtiene la tabla 5. donde se puede ver que el bagazo necesario en la caldera es 57 t/h, ligeramente superior al bagazo producido en la industria (56 t/h). El período de operación de la bioeléctrica depende de los días de zafra y de la eficiencia de operación del sistema; para alcanzar los resultados esperados la caldera debe operar con

Tabla 5. Combustible necesario en la caldera, kg/h

Energía del vapor, Kcal/h	90850100
Energía del Combustible, Kcal/h	106882471
Combustible necesario kg/h	
Bagazo	57432.816
RAC	41187.8499
Mezcla combustible, 33 % de RAC	**50818.5**

eficiencia de 87 % con el uso de la tecnología convencional en lugar de 85 % como se había previsto.

Período de operación de la bioeléctrica

En la tabla 6 se ilustra el tiempo de operación de la bioeléctrica en los períodos de zafra y en inactivo.

Con el uso de la tecnología II, para zafras de 150 y 180 días es posible la operación de la bioeléctrica después de terminada la zafra, 96 y 116 días más, con períodos de operación anual de 246 y 296 días respectivamente; mientras que con la tecnología convencional el combustible disponible solo alcanza para cogenerar en período de zafra.

Gestión de aprovisionamiento energético de la biomasa cañera

Para el uso energético de toda la biomasa cañera es necesario disponer en la industria de ins-

Tabla 6. Período de operación de la bioeléctrica

Período de operación	Tecnología II		Tecnología tradicional	
R	1.64 (Ƞ= 85 %)		1 (Ƞ= 87 %)	
Días de zafra	150	180	150	180
Período inactivo	96	116	0	0
Días de operación	246	296	150	180

R= relación entre el combustible disponible y el combustible necesario.

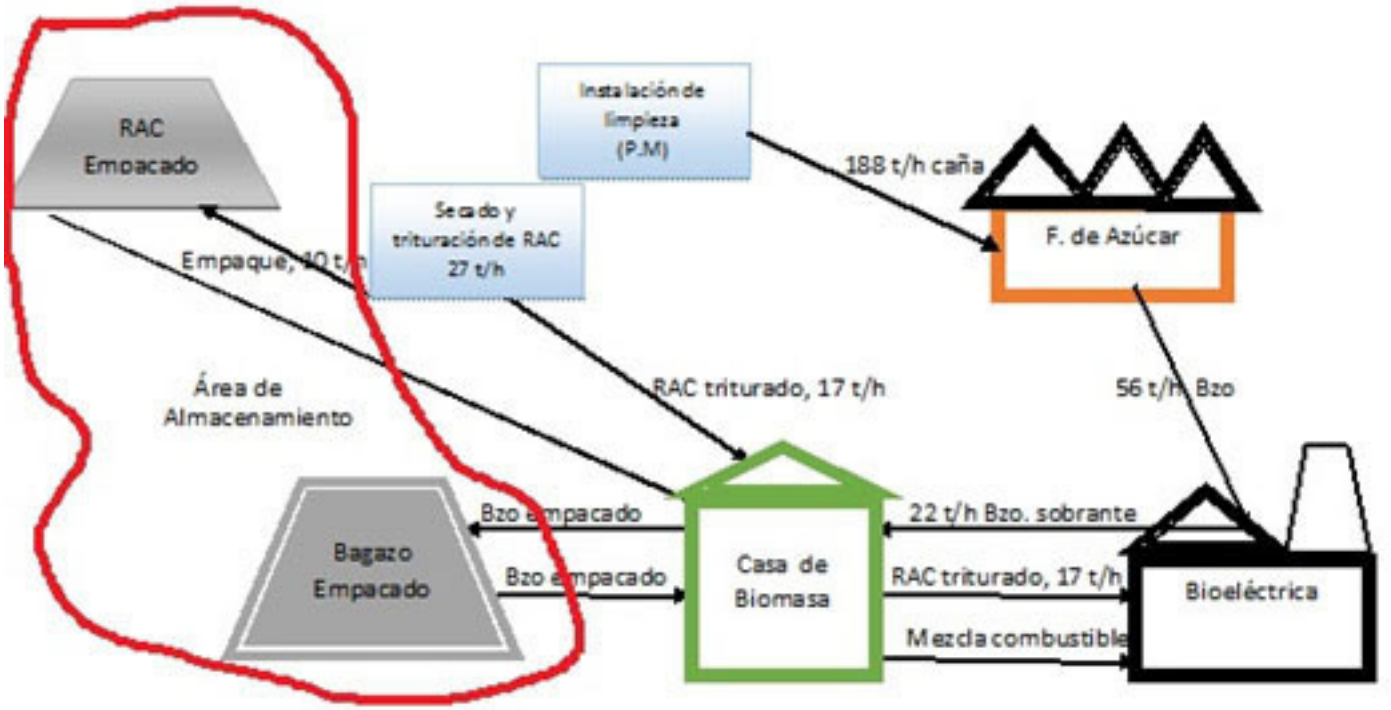

Figura 2. Diagrama de manipulación de la biomasa ena central bioeléctrica azucarera.

talaciones tecnológicas como las que aparecen en la figura 2, donde se ilustra un diagrama de detalle, de aprovisionamiento de biomasa a la bioeléctrica, en zafra y en período inactivo con el uso de la RT2; donde la caña integral cosechada, es transportada a la instalación multipropósito (IM), relativamente cerca de la industria o con arreglos según el Sistema de Cosecha Cubano (SCC) en cada central.

En la IM, la caña limpia es transportada a la industria como convencionalmente, en el SCC. Los RAC, una vez separados de la caña caen por gravedad sobre una plazoleta pavimentada, y son manipulados mediante un tractor con pala frontal, para el secado solar en pilas irregulares, durante 48-72 horas.

Posteriormente, en la plazoleta los RAC son triturados y depositados sobre los medios de transporte (como camiones con tráiler y/o trenes de carreta tiradas por tractores) y transportados a la casa de biomasa, según las necesidades de la bioeléctrica (17 t/h), de donde son alimentados a la caldera junto con el bagazo. El resto de los RAC triturados (10 t/h) son alimentados a la empacadora y almacenados al aire libre en pila piramidal, para uso de la bioeléctrica en período inactivo.

En la industria, el bagazo producido (56 t/h) es enviado directamente a la bioeléctrica donde una parte (34 t/h) se mezcla con RAC triturado (17 t/h), previamente antes de ser alimentado a la caldera, el resto del bagazo (22 t/h) continúa hasta la casa de biomasa donde se empaca y envía al área de almacenamiento.

En período inactivo, la biomasa almacenada es transportada hasta la casa de biomasa (área de preparación y mezclado), con medios de transporte empleados en zafra, para su alimentación posterior a la caldera, en la magnitud requerida y de forma continua y estable.

Logística de aprovisionamiento de biomasa cañera a la bioeléctrica

En la tabla 7 se ilustra la norma o tarea horaria en cada una de las áreas que componen el sistema de preparación y el uso energético de la biomasa cañera en la bioeléctrica asociada a la industria azucarera.

Para garantizar la cantidad de biomasa antes y después de zafra a la bioeléctrica (51 t/h), siguiendo la ruta tecnológica establecida; en sentido general, del balance de masa inicial, como se ilustra en

Tabla 7. Norma por área en la industria para el uso de la biomasa en zafra; t/h

Ruta tecnológica	Planta multipropósito		Central-bioeléctrica			
	RAC		Bagazo	Conversión energética		
	Trituración	Empaque y almacenamiento		Bagazo	RAC	Total
II	27	10	22	34	17	51
Convencional	0	0	0	56	0	56

la tabla 7; en la planta multipropósito es necesario triturar y empacar, respectivamente, 27 t/h de RAC natural y 10 t/h de RAC secado y triturado; mientras en la casa de biomasa se empacan 22 t/h de bagazo húmedo para el almacenamiento, a la vez que en la bioeléctrica se mezclan 17 t/h de RAC con 34 t/h de bagazo procedentes de la IM y la industria respectivamente, para la combustión en la caldera.

Maquinaria y equipos

Manipulación de RAC para el secado solar. Para esta operación en las instalaciones multipropósito (IM) se emplea un tractor alzadora con pala frontal, existente actualmente en las instalaciones de limpieza de la caña y un área pavimentada para el secado solar con dimensiones de aproximadamente 3200 m² para RAC con densidad igual a 28 kg/m³.

Trituración de RAC-secado. Esta es una operación de gran importancia por su influencia en la eficiencia y capacidad en las operaciones subsiguientes. Se emplean máquinas trituradoras con alta capacidad y eficiencia de preparación, como es la trituradora Bio 900 D108 CV con grúa u otro equipo similar (Bio 900 T, Lindner Urraco 75, TG 5000, etc. Ver tabla 8).

Empaque de biomasa. Para esta operación se cuenta en el mercado con una serie de máquinas como las que se relacionan en la tabla 8. El modelo JPW80QT, por las características, como alta capacidad, densidad y dimensiones de las pacas (4-7 t/h, 400 kg/m³ y 800*1100*300-2000), puede ofrecer buenos resultados (30 - 32).

Desmenuzador de pacas. Una vez terminado el período de zafra, almacenamiento y conservación de la biomasa en pila piramidal a la intemperie, las pacas de biomasa (bagazo y RAC) son transportadas a la casa de biomasa para su desmenuzación y mezclado (bagazo y RAC) previamente a la alimentación de la caldera, en período inactivo. Para esta operación se emplean entre otros equipos con el Molino TB120 con capacidad de 6 t/h y Criba de 1 1/2", con buenos resultados.

Empaque y almacenamiento de la biomasa

Para el proceso de almacenamiento de RAC con fines combustible, se consideran como base para el análisis, las Normas Cubanas (33 - 35), empleadas para el bagazo:

Estas normas exigen la existencia de condiciones como:

- Pavimentar el área requerida.
- La existencia de cisterna con casa de bombas, para cada almacén.
- Reserva de agua equivalente al volumen de una pirámide.
- Instalaciones de bombeo con flujo de entrega superior a los 40 litros/s.
- Grúas necesarias para la formación de las pirámides.

Manipulación del bagazo

El bagazo que sale del tándem de molinos, es separado en dos direcciones a la entrada de la bioeléctrica; una continua directamente a la caldera (34 t/h) donde se le incorpora la cantidad de RAC requerida (17 t/h) y la otra se orienta a las empacadoras para su almacenamiento y empleo en período inactivo (figura 2).

A la salida de las empacadoras, las pacas son

Tabla 8. Características de equipos para la preparación de la biomasa cañera

Equipo/Modelos	Precios	Capacidad	Densidad	Tamaño, mm
Trituradoras				
Bio 900 T		40/60 m³/h		
Lindner Urraco 75		Hasta 70 t/h	Alta	
Willibald Multi-cut		210-230 m³/h		30-250
Empacadoras				
JPW80QT	15000-150000 USD /u	4-7 t/h	400 kg/m³	800*1100*300-2000
JPW80QT	20000-90000 USD / Set	7 t/h		
Enerpat; HBA	5000-30000	50-80 pacas/h		800*360*360
YS2-80T			400-500 kg/bala	800*1000*1200-2000
JPW-KT180	6,500-12,000 USD / Set	3,0 t/h		750*430*310 mm
Modelo: BCE	3000-50000 USD /u	6-8 pacas /h	280-350 kg/bala	1200*800*600
Caldema		2-14 t/h.	250-480 kg/m³	540x1020x600 mm
Trituradoras de paca				
Molino TB120		6 t/h		Criba, 1 1/2"

Tabla 9. Potencial de biomasa preparada en zafras de 150 y 180 días; t/año

Período de zafra	Planta multipropósito		Central-bioeléctrica			
	RAC		Bagazo	Conversión energética		
	Tritura-ción	Empaque y almace-namiento		Baga-zo	RAC	Total
150	97200	36828	79926	122574	60372	182947
180	116640	44193	95911	147089	72447	219536

Tabla 10. Características de las pacas y pila piramidal correspondiente

Objetos	Dimensiones	No. de pacas	Densidad	Peso
	m		kg/m³	toneladas
Paca	0,8*1,1*1,5	1	400	0.528
Pila piramidal	40*20*10	5248	346,4	2771

Tabla 11. Capacidad necesaria de almacenamiento de biomasa cañera en pila piramidal

Período de zafra	Almacén de RAC		Almacén de bagazo		Totales	
	No. de pacas	No. de pilas	No. de pacas	No. de pilas	Pacas	Pilas
150	69749	13	151375	29	221124	42
180	83699	16	181650	35	265349	51

manipuladas por medio de grúas viajeras que las colocan sobre tráileres, movidos por tractores o camiones y enviadas al área de almacenamiento.

El bagazo empacado es almacenado en pila piramidal con dimensiones de 40 x 20 x 10 m (largo x ancho x altura) y canales de ventilación para el escape de vapores producto de la fermentación con aumento de la temperatura, que a la vez dan lugar al secado del bagazo hasta 20-25 % humedad.

Una parte de los RAC secados y triturados en la planta multipropósito es enviada a la caldera, para su combustión junto con el bagazo; mientras la otra (10 t/h) se empaca, transporta y almacena, similarmente como el bagazo.

Dada la distancia entre la planta multipropósito y la bioelectrica (1-2 km), los almacenes de bagazo y de RAC pueden ser continuos. En general, para la construcción de la pila piramidal, se construyen los 4 primeros pisos o niveles de la pila, manteniéndose un canal de ventilación de 50 cm cada 6 o 12 pacas a lo largo de toda la pila. A partir de ese nivel, la pila va adquiriendo la geometría piramidal hasta alcanzar alturas que oscilan entre 7 y 10 m.

Según lo descrito anteriormente, se obtiene la biomasa preparada, disponible en zafras de 150 y 180 días/año como aparece en la tabla 9.

Con el potencial de biomasa que se produce en zafras de 150 y 180 días como se ilustra en la tabla 9 y la aplicación de máquinas empacadoras como la JPW80QT se obtienen pacas y pila piramidal con las características que aparecen en la tabla 10.

En la tabla se pueden ver las características de las pacas que se producen en la empacadora JPW80QT para una pila piramidal, con capacidad de almacenar 5248 pacas equivalentes a 2771 toneladas de biomasa.

Considerando la información de las tablas 9 y 10 se obtiene la capacidad necesaria de almacenamiento de la biomasa cañera en pila piramidal al aire libre,como se muestra en la siguiente 11.

Como se ilustra en esta última tabla, para el almacenamiento de la biomasa de período inactivo es necesario construir 13 y 29 pilas de pacas de RAC y bagazo, respectivamente, para un total de 42 pilas en una zafra de 150 días; mientras en una zafra de 180 días es necesario construir 16 y 35 pilas para un total de 51 pilas.

La NC 96-01-05: 89 (33) establece que se creen áreas de almacenamiento de 6 pirámides cada una con distancias entre ellas de 10 m y distancias a la cerca perimetral y a la próxima zona de almacenamiento de 50 m.

Como en zafras de 150 días se deben armar 42 pirámides; esto implica la creación de 7 áreas de almacenamiento para garantizar la producción anual de biomasa, para período inactivo; dos de RAC y cinco de bagazo. Mientras que en zafras de180 días es necesario crear nueve áreas de almacenamiento, tres de RAC y seis de bagazo, para preservar la producción anual de biomasa en zafra.

Cada área de almacenamiento tiene una superficie de 7 000 m^2, lo que significa pavimentar 49 000 y 63 000 m^2 para zafras de 150 y 180 días respectivamente, para la construcción de los almacenes necesarios, la adquisición de al menos; una grúa/área y la construcción de una casa de bombas con su correspondiente cisterna.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las características de la RT2, como: el uso racional de los medios de transporte, el incremento de valor agregado de los productos de la cosecha centralizado cerca de la industria, la eficiencia industrial en la producción de azúcar y el uso del potencial de biomasa que se produce en el cultivo de la caña; facilitan el aprovechamiento sustentable de los RAC como fuente de energía en las bioeléctricas azucareras.
2. En zafras de 150 y 180 días es posible potencialmente, la operación de la bioeléctrica durante 96

y 116 días después de terminada la zafra, con el uso de la RT2 y períodos de operación anual de 246 y 296 días respectivamente; mientras con la ruta tecnológica convencional el combustible disponible solo alcanza para cogenerar en período de zafra.

3. Para el almacenamiento de la biomasa durante el período inactivo es necesario construir 13 y 29 pilas de pacas de RAC y bagazo, respectivamente, para un total de 42 pilas en siete áreas de almacenamiento en una zafra de 150 días; mientras en una zafra de 180 días es necesario construir 16 y 35 pilas para un total de 51 pilas, en nueve áreas de almacenamiento, así como la adquisición en ambos casos, de al menos una grúa/área de almacenamiento y la construcción de una casa de bombas con su correspondiente cisterna. Esto significa la pavimentación de 49000 y 63000 m² de superficie en zafras de 150 y 180 días respectivamente, para la construcción de los almacenes necesarios.
4. A partir de los resultados obtenidos, se debe realizar una evaluación técnico-económica de aplicación de la RT2 en la práctica social de la agroindustria azucarera, considerando también su contribución a la preservación del medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS

1. Energía Repsol. El petróleo seguirá siendo la fuente energética más utilizada en el 2040. Htto://www.repsol.com; 2017. Consultado: 04/07/2018; 9:26 a.m.
2. Castro, R. F. Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Río de Janeiro, Brasil. 1992.
3. Unión Europea. La cooperación con los países en vía de desarrollo. Cumbre mundial de Johannesburgo sobre Desarrollo Sostenible. 2002.
4. Martínez, P. A.http://www.cubaenergia.cu/index.php/es/publicaciones/renovable-cu/41-renovable-cu-septiembre-2015/file; 08/02/2017, 9:05 am. Consultado 04/07/18
5. Fernández, M. A. Ingeniería y Medio Ambiente. N0. 4. 2010. http://www.alu.ua.es/v/vap/index.htm; 04/01/2018; 8:56 a.m.
6. Ponvert D. R. y Batista D. Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4591.3843. Universidad Agraria de La Habana, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba Consultado: 04/07/2018; 9:26 a.m.
7. Rico, J. Energía de la biomasa. Manuales de energías renovables. Depósito Legal: M-44500-2007. ISBN: 978-84-96680-15-9. Madrid, octubre de 2007. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_28e17c9c.pdf. Consultado, 20/05/2018.
8. Máquinas trituradoras de biomasa. http://www.difloral.com.mx/1402857404_máquinas-trituradoras-de-biomasa.html. Consultado: 04/07/2018; 9:26 a.m.
9. Picursa S.A. Desarrollo de maquinaria agrícola. https://www.picursa.com/blog/portfolio_category/trituradoras-agricolas/page/2/. https://www.interempresas.net/Madera/FeriaVirtual/Escaparate-Serrat-Trituradoras-1114.html. Consultado: 04/07/2018; 9:26 a.m.
10. Jarabo, F.; Fernández J. Energía de la biomasa. (En línea) Tenerife. Edición S.A. de Publicaciones Técnicas, 1997. ISBN 84-86913-04-7. (Resumen del libro); http://documentslide.com/documents/energia-de-la-biomasa-55b07ac294761.html. (Consultado, 10 jul. 2018).
11. Copena R. D., Simón F., X. La producción de energía eléctrica a partir de la biomasa forestal primaria: análisis del caso gallego. Universidad De Vigorevista Galega De Economía, vol. 23, núm. 2 (diciembre 2014), pp. 91-112 issn 1132-2799
12. Marques L. Maquinaria agrícola para la recolección. Ministerio de la agricultura, alimentación y medio ambiente, Hispano Brasileña S.L; www.Hb-ediciones.com. 2014.
13. Sicilia P. J. R. Instalaciones de biomasa. 1ª edición: febrero 2016, Ediciones C/ Rivas, 25 28052 Madrid, España; www.fundacionlaboral.org .Depósito Legal: M-5435-2016
14. Rodríguez, E. Las plantas de energía de biomasa más grandes del mundo. 2 Abr, 2014.http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-de-biomasa-mas-grandes-del-mundo/. Consultado: 06/07/2018, 11:36, a. m

15. Carrasco E. J. La biomasa como recurso para la generación eléctrica. Jornada sobre el estado actual y perspectivas de la generación eléctrica con biomasa en España; Madrid, 12 de Noviembre de 2009.
16. Artígas C. de S. J. "Objetivos en los sectores de la biomasa y los residuos. El ICAREN", Departamento de Biomasa y Residuos. Jornada Técnica PER 2011-2020. Madrid, 13 de diciembre de 2011.
17. Sánchez, Á. Abengoa construirá la mayor planta de biomasa del mundo en Reino Unido. Madrid 10/09/2015. http://economia.elpais.com/economia/2015/08/10/actualidad/1439192868_374966.html. Consultado 16/05/2018.
18. Roca, S. J A. Las 10 mayores plantas de biomasa del mundo. 11/01/2016. http://elperiodicodelaenergia.com/;mail:redaccion@elperiodicodelaenergia.com 08/02/2017, 11:45, a. m
19. Aguilar P. A., Aguilar E.D. Nuevos paradigmas en la cosecha de la caña para el uso sustentable de la biomasa en la bioeléctrica. Parte II.ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar 51 (1) enero- abril, 2017.
20. Hernández, S. A., González M. V. M. y Freide O. M. L. Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de azúcar Antonio Sánchez. Revista Centro Azúcar, Vol. 44 No.4 Octubre-Diciembre, 2017.
21. Sánchez, B. Y.; Ahmed,M. E. E.; Piloto, R. R. y Sierens, R. El escenario energético cubano. 17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura CUJAE. Palacio de las Convenciones de la Habana. Nov. 2014.
22. Fernández B., M. Mejorar la eficiencia energética en la industria azucarera. Semanario Económico y Financiero de Cuba. Febrero de 2014.
23. Aguilar, P. A.; Pérez ,H. J. A.; Aguilar, E.D. Nuevos paradigmas en la cosecha de la caña para el uso sustentable de la biomasa en la bioelectrica. Parte I. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar 50 (3) sept. - dic., 2016
24. Aguilar ,P. A.; Aguilar, E.D. Nuevos paradigmas en la cosecha de la caña para el uso sustentable de la biomasa en la bioelectrica. Parte II.ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar 51 (1) enero- abril, 2017.
25. Fernández, J. La biomasa para las bioélectricas en Cuba: caracterización, disponibilidad y manejo. Congreso de Diversificación 2017. Sección de energía, págs. 662-665.
26. Hugot, E. 1986. Manual para ingenieros azucareros. 3.ª ed. Elservier, Amsterdam, The Netherlands. [Links].
27. Martínez, L. T.; Dopíco, R. D.; Triana, H. O.; Medina, E. M. Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 47, núm. 2, mayo-agosto, 2013, pp. 13-22
28. Aguilar, A. Potencialidad de los residuos agrícolas de la caña. Parte I: Características energéticas. Revista Cuba Azúcar No. 1. pág. 38. 1989.
29. Aguilar, A. Apuntes sobre la revalorización de los residuos agrícolas
de la caña. Tecnologías de preparación. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 2014, vol. 48, no. 2 (mayo-agosto), pp. 50 – 55.
30. Trituradoras Milanuncios.com.https://www.milanuncios.com/maquinaria/trituradora-industrial.htm. Consultado: 04/07/2018; 10:26 a.m.
31.https://spanish.alibaba.com/product-detail/kitchen-waste-crusher-food-waste-shredder-organic-waste-shredder-60627061659.html. Consultado: 04/07/2018; 10:26 a.m.
32. Prensa empacadora Caldema. https://www.caldema.com.br/es/productos/componentes/prensa-empacadora 31. https://spanish.alibaba.com/product-detail/semi-automatic-hydraulic-horizontal-baling-press-machine-used-for-sugarcane-bagasse-ys2-80t.
33. NC 96 - 01 - 05: 89. SNPCI. Almacenamiento de bagazo de caña de azúcar en pacas. Requisitos Generales. Cuba, 1989.
34. NC 96 - 02 – 09: 87. SNPCI. Instalación de sistemas de suministro de agua. Requisitos Generales. Cuba, 1987.
35. NC 96 - 03 - 01: 87. SNPCI. Protección contra las descargas eléctricas atmosféricas. Clasificación y Requisitos Generales. Cuba, 1987.