

PROPUESTA DE BIOELÉCTRICA INTEGRADA CON UN CENTRAL AZUCARERO

Por **Danay Sánchez Orama***, Lic. **Maday Sánchez Orama****,
Dr. C., M. Sc., Ing. **José Luis Sánchez Ávila***** y M. Sc. Ing. **Marlene Orama Ortega******

* Estudiante de Ingeniería Mecánica. Universidad de Matanzas, miembro de Cubasolar Matanzas.
<https://orcid.org/0009-0006-5717-5655>

E-mail : danays.orama@gmail.com; tel. : (53) 59249587

** Miembro de Cubasolar Matanzas. Lic. Química. Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB).

<https://orcid.org/0009-0004-1819-3813>

E-mail: madaysanma@gmail.com; tel.: (53) 55730929

*** Miembro de Cubasolar Matanzas

<https://orcid.org/0000-0003-3216-1397>

E-mail: joseluis@dpmt.bandec.cu; tel.: (53) 54555891

**** Miembro de Cubasolar Matanzas. Universidad de Matanzas.

<https://orcid.org/0000-0002-6215-4262>

E-mail: marlene.oramas@umcc.cu; tel.: (53) 55730930

Resumen

La propuesta consiste en las tecnologías posibles de aplicar para la inversión en conjunto de una Bioeléctrica con un Central Azucarero, buscando la máxima complementación e integración tecnológica de ambos para la reducción de su consumo de energía eléctrica y sus costos, además de la producción de azúcar, alcohol, biogás, abono, dextrosa y lo más importante la producción de una cantidad de energía eléctrica, que mediante su venta a la Unión Eléctrica (UNE), le permita recuperar la inversión a ejecutar en un tiempo prudencial. Para ello se proponen y analizan dos variantes de molienda anual.

Palabras clave: bioeléctrica, industria azucarera, energía renovable, medioambiente.

PROPOSAL FOR A BIOELECTRIC PLANT INTEGRATED WITH A SUGAR PLANT

Abstract

The proposal consists on the technologies possible to apply on the whole for the investment of a Bioelectric with a Sugar Mill station, looking for the maximum complementation and technological integration of both for the reduction of its electric power consumption and its costs, besides the production of sugar, alcohol, biogas, fertilizer, dextrose, and the most important thing the production of a quantity of electric power that by means of its sale to the Electric Union (UNE), allow it to recover the investment to execute at one time prudential. For they intend it and we analyze two variants of annual mill.

Keywords: Renewable energy, environment, Energy efficiency.

I. Introducción

El desarrollo de la Sociedad humana está basado en el consumo de grandes cantidades de energía. La energía que circula por los ecosistemas y permite vivir a los seres vivos, procede en primera instancia del Sol. Sin embargo, a pesar del desarrollo científico y tecnológico, todavía la humanidad no ha aprendido a aprovechar eficazmente esta fuente inagotable, es por ello que la mayor parte de la energía que se utiliza procede de los recursos naturales existentes en el subsuelo de nuestro planeta, fundamentalmente los combustibles fósiles y el uranio.

Situación energética internacional

Las actividades energéticas están muy íntimamente relacionadas al cambio climático, los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón, el gas, etc., representan el 87 % de la energía mundial y contribuyen de manera muy importante al calentamiento del Planeta, por estas causas los expertos afirman que las reservas de combustibles solo durarán entre 140 y 150 años más aproximadamente, por lo que se deben buscar fuentes sustitutivas de energía como las energías renovables.

Cuba, país tradicionalmente azucarero y dependiente del uso de combustibles fósiles para usos industriales y en menor cuantía en la industria azucarera, presenta una organizada estructura de su Sistema Electroenergético Nacional (SEN), que trabaja sincronizado con las Unidades Básicas de Producciones Azucareras, las que aportan energía eléctrica durante la campaña de zafra.

Factibilidad de utilización de la caña de azúcar como biomasa

La biomasa no es más que la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica; esa energía se puede recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles, tales como carbón vegetal y biogás (CONAE, 2022), (CRE, 2023) y (SENER, 2023).

El contenido energético que posee la caña de azúcar puede observarse en las siguientes potencialidades:

- Es capaz de almacenar el 1,7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales y 1,1 % en campos bien atendidos con regadío.
- Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 toneladas por hora (t/h), con un máximo teórico de 333 t/h. Si se compara con otros cultivos es más ventajoso.
- Para un valor calórico de 17 476 kJ/kg de materia seca (MS), con un contenido de MS del 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea (ha), la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla hacia el ingenio.
- Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja con el 30 % de humedad es 11,7 MJ/kg).
- El valor calórico del bagazo (con 50 % de humedad) es de 7,64 MJ/kg, semejante al de la madera: 7,9 MJ/kg según estudios realizados por diversos autores (Best,

1998; Grinds 2001; Llanes, 1994; Magassiner, 1994; Mesa, 2003; Sinclair 1997), reflejados en Peralta y Martín (2000).

Cogenerar es la producción simultánea de calor y electricidad usando un solo portador energético primario, utilizándose el calor para el proceso productivo de una industria, en este caso para producir azúcar. La energía eléctrica se utilizaría para el consumo propio de la industria y exportar al Sistema Electroenergético Nacional el resto de la energía generada que no se utilice.

Una de las metas a alcanzar en la cogeneración es generar y exportar el máximo posible de energía eléctrica, mediante el incremento de la presión y temperatura del vapor de agua generado, con un notable incremento del aprovechamiento de agua del proceso, mediante una adecuada selección y tratamiento del agua vegetal a utilizar, garantizando el vapor de agua necesario para la producción de azúcar y alcohol, disminuyendo los consumos de estos en el proceso fabril y por consiguiente la disminución del consumo eléctrico en la fábrica azucarera (Borges *et al.*, 2021) y (Borges *et al.*, 2020).

Objetivos de la propuesta de proyecto

Económicos: Obtener mediante la venta de la energía generada y exportada (kWh), la producción de azúcar y de alcohol, la liquidez suficiente que permita pagar deudas, ofrecer un retorno a los accionistas y a la vez, ser atractivo para Cuba, para la Empresa AZCUBA y para la Unión Eléctrica (UNE), en términos y plazos aceptables por todos.

Técnicos: Presentar esquemas básicos con tecnología existente, que permitan abastecer de electricidad y vapor a la fábrica de azúcar y vender excedentes de energía.

II. Materiales y métodos

Las ventajas de este proyecto de cogeneración vendrían dados por:

- **Cogenerar:** Es compatible con el incremento de eficiencia y modernización de la industria del azúcar.
- **Económico:** El costo de la biomasa es menor que el costo del petróleo equivalente y otros combustibles fósiles.
- **Inversiones:** Con una sola inversión se sustituyen dos inversiones independientes: azucarera y termoeléctrica.

La industria azucarera se encuentra en estos momentos en un punto crítico, debido a la crisis energética y económica mundial, por lo que ya es tiempo de dar el salto tecnológico necesario en el desarrollo de dicha industria, que permita un incremento de la eficiencia y la productividad; para ello se deben trazar sólidas y firmes estrategias que logren un incremento de la producción combinada de energía, azúcar y sus derivados, mediante una alta eficiencia (Fernández, 2019), (Medina, 2022) y (Sánchez Abreu, 2018).

Estrategias a seguir para el buen resultado de la inversión:

1. Disminuir los consumos propios de vapor para la producción de azúcar y alcohol a valores inferiores a 400 kg por toneladas de caña.

2. Aumento de los parámetros del vapor generado (temperatura y presión) y en correspondencia con el aumento de la eficiencia de los equipos del bloque energético.
3. Utilización de ciclos regenerativos y recalentamientos.
4. Utilización de la paja como combustible complementario.
5. Uso de otros combustibles alternativos como por ejemplo el biogás, el marabú o las costaneras y residuales de aserríos y podas.

Listado de inversiones para la construcción de una bioeléctrica de 50 MW para un central azucarero, que incluye el montaje de:

1. Tres calderas de 110 toneladas por hora de vapor de agua (t/h) con sistema de limpieza de gases y chimenea.
2. Dos turbogeneradores de extracción-condensación de 25 MW cada uno, con los paneles de mando, control y distribución y sistema de enfriamiento, o valorar la instalación de cuatro turbogeneradores de 12,5 MW, mediante un estudio preliminar de factibilidad de acuerdo a la disponibilidad de biomasa y a la flexibilidad que se le quiera dar al proyecto.
3. Un sistema de recepción, almacenamiento, preparación y transporte de biomasa.
4. Un central azucarero capaz de realizar una molienda potencial de 10 000 toneladas de caña al día, más un destilería de alcohol utilizando la miel final como materia prima.
5. Biodigestores que permitan tratar la cachaza, el mosto de la destilería y otros subproductos, para obtener biogás y abono orgánico.
6. Fábrica de producción de dextrosa, esta última permitiría reactivar la producción de sueros fisiológicos por la industria farmacéutica. Evitándose su actual costosa importación.
7. Plantas de tratamiento térmico y químico de agua.
8. Sistemas auxiliares de protección contra incendio, contra descargas atmosféricas y aterramiento.
9. Alumbrado led interior y exterior, canalizaciones para fuerza y control.
10. Automatización de todos los sistemas.

Costos de inversión

Teniendo en cuenta los costos de inversión de las tecnologías disponibles en el mercado, así como las últimas inversiones realizadas en México en instalaciones de este tipo (SENER, 2023), se obtiene que el costo de inversión se encuentra en el siguiente entorno:

Bioeléctrica: 83 847 270 USD
 Central azucarero: 52 858 380 USD
 Total: 136 705 650 USD

Como puede observarse el costo de inversión del central azucarero es mucho menor ya que utilizaría el vapor de las

calderas de la Bioeléctrica, así como la electricidad que produce.

El financiamiento del proyecto se concibe sobre la base del impacto económico del mismo con vistas a lograr:

1. Activar en el sector agroindustrial azucarero plantas de producción energética capaces de autoabastecer el sector y entregar energía eléctrica al país, a partir de materias primas locales y renovables.
2. Sustener e incrementar la producción energética contribuyendo con el autoabastecimiento de la producción azucarera, abaratando el costo de la energía y de la producción de azúcar.
3. Lograr unidades de producción con óptimas condiciones de explotación con buenas condiciones de producción y caracterizada por un constante aumento de la productividad.

Opciones de operación y molienda

Se aclara que en todos los cálculos realizados en este trabajo se tomaron los datos de los valores medios existentes en el mercado, así como los rendimientos utilizados son los valores medios anuales, de acuerdo a los datos de los Organismos Internacionales que rigen la actividad. En resumen existen dos propuestas u opciones prácticas:

Primera opción: Realizar una zafra de 120 días y 290 días para generar con biomasa forestal.

La planta bioeléctrica, operará como una planta de generación eléctrica, utilizando como combustible el bagazo que sale de los molinos de la fábrica de azúcar, combinando este con el RAC (residuo agrícola cañero) en aras de lograr un abastecimiento estable de combustible, mientras que en el período fuera de la zafra será necesario utilizar fundamentalmente la biomasa cañera tributada por los centrales azucareros de la provincia, e incorporar la biomasa forestal (Peralta y Martín, 2000).

Se prevé que esté formada básicamente por tres calderas con capacidad de 110 t/h que trabajará a una presión de 67 bar y una temperatura de 510 °C, con una eficiencia como mínimo del 86 % y por dos turbogeneradores de extracción-condensación de 25 MW o cuatro de 12,5 MW para darle mayor flexibilidad a la industria, incluyendo todos los sistemas auxiliares y de automatización. La energía eléctrica sería vendida al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) a través de una subestación de enlace de 13,8 kV a 110 kV, además se produciría azúcar crudo y alcohol en la destilería del central, pudiéndose también analizar la factibilidad de producir dextrosa y otros productos como biogás a partir de la cachaza.

En el periodo de zafra se trabajarían 120 días, mezclando las 2800 t de bagazo con 643 t de RAC (residuos agrícolas cañeros), que equivale a un 22,9 %, para suplir el déficit de combustible en la alimentación de la caldera, quedando un sobrante de 1057 t/día de RAC que se pueden ir almacenando para el período posterior a la zafra, ver Anexo I. En esta etapa se generan los 50 MW, siendo consumidores la Destilería de alcohol, el central azucarero y la Bioeléctrica.

En el periodo fuera de zafra se trabajarían 50 días con la biomasa acumulada del tiempo de zafra, mezclando el

bagazo con un 22 % de RAC. En esta etapa se generan los 50 MW, siendo consumidores la Destilería y la Bioeléctrica. Se trabajarían 50 días con la biomasa tributada de los centrales de la provincia de Matanzas, mezclando el bagazo con un 22 % de RAC. En esta etapa se generan los 50 MW, siendo consumidores la Destilería, la fábrica de dextrosa y la Bioeléctrica. En esta etapa se le daría mantenimiento al central azucarero.

Se trabajan 70 días, con la biomasa forestal tributada de la provincia de Matanzas, como son costaneras, residuales de podas forestales y agrícolas, marabú y otras especies forestales invasivas como la *Melaleuca quinquenervia* (Cayepu), planta invasora de zonas cenagosas, a la cual después de obtenerse el corcho de la parte externa de su tronco y la esencia repelente de sus hojas puede ser preparada como biomasa, existiendo la posibilidad de incrementar la eficiencia productiva mediante la comercialización de esos dos productos *altamente cotizados*, de dicho árbol. Quedando 75 días para ajustes y reparaciones.

Segunda opción: Realizar una zafra de 360 días y 365 días generando con biomasa propia.

Esta opción no es tan descabellada, ya que se está aplicando en muchos países, basado en un sistema continuo y predictivo de mantenimiento. Esto no solo permitiría generar electricidad todo el año con menos costo (no es necesario acarrear combustible de otros centrales ni de otras zonas alejadas), si no a la vez se produciría azúcar y alcohol todo el año, lo que reduciría el tiempo de recuperación de la inversión y se pudiera pensar hasta en la factibilidad de invertir en una refinería, teniendo en cuenta que el azúcar refinado duplica el precio del azúcar cruda.

En el mismo Anexo I se puede observar que para un rendimiento promedio de 70 t de caña por hectárea (ha), se necesitaría para una zafra 20 057 ha sembradas de caña (De la Caridad *et al.*, 2022), que coincide aproximadamente con el área sembrada promedio de un central con esa norma potencial, por lo que para moler 360 días se necesitarían 60 171 ha de caña sembradas, que es el área equivalente a sembrar de tres centrales azucareros. Conociéndose que en la provincia de Matanzas existen 16 centrales azucareros desactivados, con el área de sembrado de tres de ellos sería suficiente, lo que el central con su Bioeléctrica debería estar situado en un lugar accesible para la transportación de la caña cortada.

Generación de vapor

La generación de vapor se lograría con tres calderas de 110 t/h de vapor, a una presión de 67 bar, una temperatura de 510 °C, un índice de generación de 2,3 toneladas de vapor por tonelada de combustible y una eficiencia de al menos un 86 %. Por lo que para 330 t/h de vapor necesitaría diariamente 3443 t de combustible. Como puede observarse en el Anexo I en un día de molienda se obtendrían 2800 t de bagazo y 1700 t de RAC, para un total de 4500 t diarias disponibles, lo cual alcanzaría para generar todo el vapor necesario y quedaría un sobrante diario de 1057 t de bagazo y RAC (Rubio González *et al.*, 2018) y (Rubio González & Rubio Rodríguez, 2018).

Esta generación de vapor se utilizaría en dos turbogeneradores de extracción condensación de 25 MW, o en su defecto

cuatro de 12,5 MW, quedando en total 50 MW de potencia instalada, que serían ubicados en el área de la planta eléctrica y generarían 1200 MWh de energía en 24 horas, además debe mantener una extracción máxima de 212 t/h de vapor y al menos una extracción mínima de 37,5 t/h de vapor de agua. Este vapor debe garantizar los procesos de producción de azúcar, alcohol y dextrosa, esta última permitiría reactivar la producción de sueros fisiológicos por la industria farmacéutica.

Planta de tratamiento térmico

La planta de tratamiento térmico esencialmente debe estar prevista de torre desareadora, así como de bombas auxiliares. También se debe incluir un condensador vertical que sea capaz de condensar las 330 t/h de vapor máximo que pueden salir exhaustos de la turbina de vapor, el cual utilizaría agua de enfriamiento proveniente de una torre de enfriamiento del tipo elíptica de última generación.

Sistema contra incendios

Este sistema tiene como objetivo garantizar la reserva de agua contra incendios para un tiempo de dos horas de autonomía. Además debe proteger toda el área de la planta utilizando medio de extinción fijo y portátil y cumplir con las normas cubanas contra incendios vigentes en el país y en la Industria Azucarera Nacional.

Este sistema protegerá todas las áreas de la Bioeléctrica, edificaciones socio administrativas, almacenes y pizarras de distribución eléctrica. El sistema debe ser automático con tablero central y estaciones de alarma manual.

Planta de tratamiento químico de agua

Tiene como objetivo fundamental efectuar un tratamiento físico y químico al agua, que permita reducir o eliminar componentes no deseados en los diferentes sistemas y procesos en los que será utilizada. Además debe satisfacer las necesidades de agua para los diferentes procesos y sistemas de las plantas a las cuales presta servicio.

Esta planta debe diseñarse para la mayor utilización posible del agua vegetal que se extrae al jugo de la caña de azúcar, en su proceso de concentración y el que no pueda ser utilizado como agua de reposición, debe ser preparado para su utilización mediante fertirriego en las mismas áreas cañeras del central.

Sistema de almacenamiento y transportación de biomasa

La filosofía de trabajo del sistema cuenta con los fines siguientes:

1. Transportar el bagazo desde la Planta Moledora hasta el almacén de combustible, mediante transportadores de banda y cuando el almacén de combustible este lleno, se pondrá en funcionamiento el transportador de banda que va hacia el patio de almacenamiento.
2. Transportar el bagazo de alimentación a la caldera directamente desde el almacén de combustible de forma estable hasta la planta generadora de vapor, para su uso como combustible, según la demanda, el sobrante

es enviado mediante la combinación de los diferentes transportadores para su almacenamiento en el almacén de combustible mecanizado o patio de almacenamiento.

3. Transportar la biomasa cañera o forestal desde el patio, en caso de mezclado de biomasa, directamente al almacén de combustible que alimenta la caldera, para suplir el déficit en la misma, según la demanda y mantenerla llena en todo momento.

El almacén de bagazo debe estar provisto de todos los equipos que confieren su carácter mecanizado a la transportación de bagazo, teniendo dos posibilidades de alimentación a la caldera, previendo un caso de rotura. Debe estar construido de tal manera que evite el transporte por suspensión de residuales de bagazo fuera del local.

Alumbrado industrial

Alumbrado Exterior: Será desconectado o atenuado, de acuerdo a su nivel de utilización, por temporizadores, fotoceldas, o combinación de ambos.

Alumbrado de emergencia: En todos los lugares críticos, de la planta: escaleras de subida o bajada; tableros centralizados, zona de operación de turbinas, edificios socio administrativos y en todos los demás puntos que lo requieran, ubicar lámparas de alumbrado de emergencia, con baterías de Níquel-Cadmio de 110 Voltios, las cuáles se cargan de forma automática y producen el encendido inmediatamente cuando se interrumpe la energía eléctrica en las zonas fabriles, facilitándose el movimiento del personal y la evacuación en caso de emergencia.

Todo el alumbrado sería mediante luminarias led.

Sistema Centralizado de Instrumentación

El Sistema de Control y Supervisión permite el seguimiento del proceso desde una computadora de supervisión general. La unión en red de todas las computadoras dedicadas al control y supervisión del funcionamiento del proceso tecnológico en la Bioeléctrica. El enlace de los autómatas a esta red de computadoras se hace a través de un sistema de red industrial, que garantiza la independencia de los subsistemas individuales de control y supervisión que manipulan directamente los autómatas y otros elementos propios de cada área.

Sistema de automatización y control de la Bioeléctrica

El sistema de automatización y control tiene como objetivo alcanzar niveles óptimos de gestión en todas las áreas productivas y administrativas que conforman la estructura de la planta, destinado al control global del proceso productivo de la misma, así como al sistema gerencial de la Empresa en su conjunto. Está integrado por niveles jerárquicos distribuidos física y lógicamente.

Taller de instrumentación

El taller de instrumentación ofrecerá servicio de verificación, calibración y mantenimiento de todo el equipamiento de automatización y control de las plantas que conforman el complejo.

Mantenimiento

Garantizará el mantenimiento preventivo a todos aquellos equipos tecnológicos de la Bioeléctrica y establecerá

un sistema de mantenimiento predictivo (Sánchez Avila J.L., 1999) para el equipamiento o sistemas imprescindibles de la industria (turbogeneradores, calderas y tandem de molinos), de forma tal que se minimice la pérdida de tiempo por roturas imprevistas y además garantice que las labores de mantenimiento planificadas afecten lo mínimo posible el proceso productivo de la instalación.

III. Análisis y discusión de los resultados Cálculo económico

Primera opción: Realizar una zafra de 120 días y 290 días para generar con biomasa forestal.

La cantidad de energía eléctrica que se deja de producir en los generadores primarios de energía que utilizan combustibles fósiles, después de ejecutada la inversión propuesta para 290 días generando electricidad, se calcula como:

$$EeT = Np \cdot Ep \cdot Tta \cdot 24 \text{ h/día} = 0,90 \cdot 50\,000 \text{ kW} \cdot 290 \text{ días/año} \cdot 24 \text{ h/día}$$

$$EeT = 313\,200\,000 \text{ kWh/año}$$

Donde:

EeT → Energía eléctrica que se deja de producir en las centrales termoeléctricas, kWh/año

Np → Norma potencial del central azucarero, 90 %

Ep → Potencia nominal de los turbogeneradores, kW

Tta → Tiempo de trabajo al año, 290 días/año

El costo de producción de electricidad al año se calcula como el costo unitario promedio mundial por la producción de energía eléctrica en las Bioeléctricas por la producción de esta propuesta:

$$Cpe = Cue \cdot EeT = 0,03 \text{ USD/kWh} \cdot 313\,200\,000 \text{ kWh/año} = 9\,396\,000 \text{ USD/año}$$

Donde: Cpe → Costo de producción de energía eléctrica, USD/año

Cue → Costo unitario de energía con biomasa, 0,03 USD/kWh

El ingreso real sería según la tarifa de compra de energía generada con biomasa por la Empresa Mixta Biopower SA. Resolución del MFP No. 150/2014, de 0,10 USD/kWh. Por tanto, si se mantiene dicha Resolución para todas las inversiones de ese tipo, teniendo en cuenta que se puede vender alrededor del 70 % de la energía producida, los ingresos serían:

$$lee = Tarifa \cdot EeT \cdot Ee = 0,10 \text{ USD/kWh} \cdot 313\,200\,000 \text{ kWh/año} \cdot 0,70$$

$$lee = 21\,924\,000 \text{ USD/año}$$

Donde:

lee → Ingresos por vender el excedente de energía, USD/año

Tarifa → Tarifa de compra de energía, 0,10 USD/kWh

Ee → Por ciento de energía posible a vender, %

La utilidad por la producción de energía eléctrica se determina por la expresión siguiente:

$$Upe = 21\,924\,000 \text{ USD/año} - 9\,396\,000 \text{ USD/año} = 12\,528\,000 \text{ USD/año}$$

Donde:

Upe @ Utilidad por vender la energía eléctrica sobrante, USD/año

El resto de los costos, ingresos y utilidades por cada producto propuesto a fabricar se encuentran en el Anexo I.

Como puede observarse en el Anexo II para esta variante se recupera la inversión en ocho años aproximadamente, con un Valor actual neto al cabo de los 10 años de 89 650 000 USD y una tasa interna de retorno de 13,20 %. Se deduce que esta opción es superior con relación a una inversión en una central termoeléctrica. No obstante a continuación se analiza la segunda opción.

Segunda opción: Realizar una zafra de 360 días y 365 días generando con biomasa propia.

La cantidad de energía eléctrica que se deja de producir en los generadores primarios de energía que utilizan combustibles fósiles, después de ejecutada la inversión propuesta, para 365 días generando electricidad, se calcula como:

$$EeT = Np \cdot Ep \cdot Tta \cdot 24 \text{ h/día} = 0,90 \cdot 50\,000 \text{ kW} \cdot 365 \text{ días/año} \cdot 24 \text{ h/día}$$

$$EeT = 394\,200\,000 \text{ kWh/año}$$

Donde:

EeT → Energía eléctrica que se deja de producir en las centrales termoeléctricas, kWh/año

Tta → Tiempo de trabajo al año, 365 días/año

El costo de producción de electricidad al año se calcula como el costo unitario promedio mundial por la producción de energía eléctrica en las Bioeléctricas mediante biomasa propia y es:

$$Cpe = Cue \cdot EeT = 0,03 \text{ USD/kWh} \cdot 394\,200\,000 \text{ kWh/año} = 11\,826\,000 \text{ USD/año}$$

Donde: Cpe @ Costo de producción de energía eléctrica, USD/año

Cue → Costo unitario de energía con biomasa, 0,03 USD/kWh

El combustible ahorrado por este concepto se calcula multiplicando este valor por el consumo específico de combustible medio del país, que es de 260 g/kWh (gramos de combustible por kWh producido)

$$Cah = EeT \cdot Bc = \frac{394\,200\,000 \text{ kWh/año} \cdot 260 \text{ g/kWh}}{1\,000\,000 \text{ g/t}}$$

$$= 102\,492 \text{ t/año}$$

Donde:

Cah → Combustible fósil ahorrado al año, t/año

Bc → Consumo específico de combustible del país, 260 g/kWh

Lo cual equivale a que gracias a la inversión propuesta además de dejarse de consumir 102 492 toneladas de combustibles fósiles anuales, o sea aproximadamente 88 660 litros de hidrocarburos al año, por este concepto se dejarían de emitir a la atmósfera 331 050 toneladas de dióxido de carbono anuales.

Al precio actual de la tonelada de combustible de 700 USD, el país puede ahorrar con la propuesta realizada:

$$AP\$ = 102\,492 \text{ t/año} \cdot 700 \text{ USD/t} = 71\,744\,400 \text{ USD/año}$$

Esta cifra pudiera considerarse como el monto que se ahorra al país por producir energía eléctrica en la Bioeléctrica. No obstante el ingreso real sería según la tarifa de compra de energía generada con biomasa por la Empresa Mixta Biopower SA. Resolución del MFP No. 150/2014, de 0,10 USD/kWh. Por tanto, si se mantiene dicha Resolución para todas las inversiones de ese tipo, teniendo en cuenta que se puede vender alrededor del 70 % de la energía producida, los ingresos serían:

$$lee = Tarifa \cdot EeT \cdot Ee = 0,10 \text{ USD/kWh} \cdot 394\,200\,000 \text{ kWh/año} \cdot 0,70$$

$$lee = 27\,594\,000 \text{ USD/año}$$

Donde:

lee → Ingresos por vender el excedente de energía, USD/año

Tarifa @ Tarifa de compra de energía, 0,10 USD/kWh

Ee @ Por ciento de energía posible a vender, %

La utilidad por la producción de energía eléctrica se determina por la expresión siguiente:

$$Upe = 27\,594\,000 \text{ USD/año} - 11\,826\,000 \text{ USD/año} = 15\,768\,000 \text{ USD/año}$$

El resto de los costos ingresos y utilidades por cada producto propuesto a fabricar se encuentran en el Anexo I.

Como puede observarse en el Anexo II para esta variante se recupera la inversión en dos años y seis meses aproximadamente, con un Valor Actual Neto al cabo de los 10 años de 585 640 000 USD y una tasa interna de retorno, de 59,21 %. Por lo que es mucho más ventajosa esta segunda opción.

IV. Conclusiones

1. Para 290 días de operación y 120 días de zafra, el periodo de recuperación de la inversión es de ocho años aproximadamente, con un Valor Actual Neto al cabo de los 10 años de 89 650 000 USD y una tasa interna de retorno de 13,20 %, superior con relación a una inversión en una central termoeléctrica.

2. Para 365 días de operación y 360 días de zafra se recupera la inversión en dos años y seis meses aproximadamente, con un Valor Actual Neto al cabo de los 10 años de 585 640 000 USD y una tasa interna de retorno de 59,21 %. Por lo que es mucho más ventajosa esta segunda opción, pero conlleva aplicar tecnologías más modernas de mantenimiento y operación.

3. Mediante la opción dos de inversión propuesta, además de dejarse de consumir 102 492 toneladas de combustibles fósiles anuales, o sea aproximadamente 88 660 litros de hidrocarburos al año, por este concepto se dejan de emitir a la atmósfera 331 050 toneladas de dióxido de carbono anuales y se dejan de erogarse por el país 71 744 400 USD/año.

V. Recomendaciones

1. Es factible el estudio de la producción de otros productos químicos, como la propuesta de la fábrica de dextrosa para la reactivación de la fábrica de sueros, también mediante la utilización del mosto residual de la destilación de alcohol, o mediante biodigestores convertir dicho mosto, junto a la cachaza, en gas metano para ser utilizado también como biocombustible, reduciéndose la utilización de biomasa forestal para la primera opción.

2. Valorar la utilización de plantas invasoras como el Cayeput para diversificar la producción de la bioeléctrica, mediante la obtención de productos altamente cotizados en el mercado de cosméticos y perfumería. Esta planta es invasora y representa una grave amenaza a la Ciénaga de Zapata, por la infestación que hoy posee, además dicha ciénaga se encuentra relativamente cerca de cualquier central que se acometa su inversión en la provincia de Matanzas.

VI. Referencias bibliográficas

- Bances Peralta, Victor Martín (2000). *Manual de los derivados de la caña*. Instituto cubano de investigaciones de los derivados de la caña de azúcar (ICIDCA). Tercera edición.
- Borges, R. J.; González, A. Á.; Alemán, E. L. & Llanes, J. L. (2021). *Mejoras en el esquema tecnológico para lograr incrementos en la eficiencia energética en un central azucarero*. SciCommReport, 1(1), 1-14 pp.
- Borges, R. J., López; A. V., Marcos, D. D., & Rabassa, D. R. (2020). Análisis energético para la combustión de bagazo en un central azucarero. *Revista Cubana de Ingeniería*, 11(3), pp. 43-53.
- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE). (2022). Disponible en: <http://www.energia.gob.mx>.
- Comisión reguladora de energía, CRE (2023). Disponible en: <http://www.cre.gob.mx>.
- De la Caridad, Aday, Díaz, O., Gutiérrez Rodríguez, E. & Rodríguez Fernández, R. (2022). Manejo agronómico de cultivos de caña energética como biomasa combustible para bioeléctricas en Cuba. *Revista Centro Agrícola*, 49(2).
- Fernández, J. T. L. (2019). Las bioeléctricas cañeras en el contexto cubano. En revista *Eco Solar*, (69), pp. 17-21. ISSN: 1028-6004.
- Medina, Y. C. (2022). *Impacto social de una nueva perspectiva para la producción de electricidad con biomasa en Cuba*. Universidad y Sociedad, 14(S6), pp. 570-579.
- Rubio-González, A., Hernández Martínez, B., & Rubio Rodríguez, M. (2018). Programa cubano para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera para la generación de electricidad. *Revista ATAC*, 79(1), pp. 4-11.
- Rubio-González, A., & Rubio Rodríguez, M. (2018). *Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad*. Centro Azúcar, 45(4), pp. 20-31.
- Sánchez Abreu, J. E. (2018). *La industria azucarera importante fuente para la generación de electricidad en Cuba*. Caribeña de Ciencias Sociales, (junio).
- Sánchez Ávila, J.L. (1999). *Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado*. Tesis de Doctorado. Universidad de Matanzas. Matanzas, Cuba, 129 pp.
- SENER. (2023) *Energías renovables para el desarrollo sustentable en México*. Disponible en: <http://www.conaea.gob.mx>.

Propuesta de bioeléctrica integrada con un central azucarero

VII. Anexos

Anexo I

Cálculo de la producción del conjunto Bioeléctrica Central azucarero

Datos		
Norma potencial diaria:	t caña/día	10 000,00
Precio del azúcar:	USD/t azúcar	490,00
Costo producir azúcar:	USD/t azúcar	300,00
Precio del alcohol:	USD/lit	0,75
Costo producir alcohol:	USD/t meladura	50,00
Producción alcohol:	lit/t meladura	230,00
Rendimiento Industrial:	%	90,00%
Rendimiento cañero	t caña/ha	70,00
Costo producir electricidad:	USD/kW.hr	0,03

USD		
Inversión:	136 705 650	

Hectáreas necesarias a sembrar por cada periodo		
Para 1 día:	167,14	ha
Para 120 días:	20 057,14	ha
Para 360 días:	60 171,43	ha

Producción						
Cálculos para un día						
Azúcar producida	Meladura	Cachaza	Residual líquido	Bagazo	Cenizas	RAC
t/día	t/día	t/día	t/día	t/día	t/día	t/día
1 100,00	300,00	300,00	5 400,00	2 800,00	100,00	1 700,00
Cálculos para 120 días						
Azúcar producida	Meladura	Cachaza	Residual líquido	Bagazo	Cenizas	RAC
t	t	t	t	t	t	t
118 800,00	32 400,00	32 400,00	583 200,00	302 400,00	10 800,00	183 600,00
Cálculos para 360 días						
Azúcar producida	Meladura	Cachaza	Residual líquido	Bagazo	Cenizas	RAC
t	t	t	t	t	t	t
356 400,00	97 200,00	97 200,00	1 749 600,00	907 200,00	32 400,00	550 800,00

Ingresos, costos y utilidades						
Cálculos para un día						
Ingresos por azúcar	Costo de fabricar azúcar	Ingresos por alcohol	Costo de fabricar alcohol	Ingresos totales	Costos totales	Utilidades
USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día
539 000,00	330 000,00	51 750,00	15 000,00	590 750,00	345 000,00	245 750,00

Cálculos para 120 días						
Ingresos por azúcar	Costo de fabricar azúcar	Ingresos por alcohol	Costo de fabricar alcohol	Ingresos totales	Costos totales	Utilidades
USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día
58 212 000,00	35 640 000,00	5 589 000,00	1 620 000,00	63 801 000,00	37 260 000,00	26 541 000,00

Ingresos por azúcar	Cálculos para 360 días				Costos totales	Utilidades
	Costo de fabricar azúcar	Ingresos por alcohol	Costo de fabricar alcohol	Ingresos totales		
USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día	USD/día
174 636 000,00	106 920 000,00	16 767 000,00	4 860 000,00	191 403 000,00	111 780 000,00	79 623 000,00

Anexo II

Cálculo económico conjunto Bioeléctrica Central azucarero

Nota: Todos los valores en millones de USD.

Primera opción: Realizar una zafra de 120 días												
Conceptos	Años											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Inversión (CTI)	136,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Costos fijos (D)	0,00	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	
Total de costos	136,71	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	60,33	
Total de ingresos	0,00	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	85,73	
Mov. de fondos	-136,71	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	25,40	
Mov. acumulado	-136,71	-111,31	-85,91	-60,51	-35,11	-9,71	15,68	41,08	66,48	91,88	117,28	
Tri =	8,07	años	Datos									
VAN =	89,65	\$	Tasa de interés %					2				
TIR =	13,20	%	Impuesto sobre renta %					30				
			Costo de inversión \$					136,71				
			Ingresos \$/año					85,73				
			Costos de producción \$/año					46,66				

Segunda opción: Realizar una zafra de 360 días												
Conceptos	Años											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Inversión (CTI)	136,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Costos fijos (D)	0,00	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	13,67	
Total de costos	136,71	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	137,28	
Total de ingresos	0,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	219,00	
Mov. de fondos	-136,71	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	81,72	
Mov. acumulado	-136,71	-54,99	26,74	108,46	190,18	271,90	353,62	435,34	517,06	598,78	680,50	
Tri =	2,47	años	Datos									
VAN =	585,64	\$	Tasa de interés %					2				
TIR =	59,21	%	Impuesto sobre renta %					30				
			Costo de inversión \$					136,71				
			Ingresos \$/año					219,00				
			Costos de producción \$/año					123,61				

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

original, redacción-revisión y edición cada uno confirma que ha participado en un 25 %.

Contribución de los autores: Por consenso y acta firmada de los autores, estos declaran que referido a:

Recibido: 3 mayo de 2024
Aceptado: 25 de junio de 2024

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, redacción-borrador