

Aplicación Excel para estudio de parques de bioenergía

Liney González-Martínez*, Raúl Sabadí-Díaz
Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)
Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central, San Miguel de Padrón. La Habana, Cuba
[*liney.gonzalez@icidca.azcuba.cu](mailto:liney.gonzalez@icidca.azcuba.cu)

RESUMEN

Introducción. La biomasa cañera y las corrientes de materiales de los procesos de la industria azucarera y sus derivados poseen un gran potencial como fuentes renovables de energía, que captan, cada vez más, interés en su utilización, con ese fin se conciben los llamados parques de bioenergía alrededor de centrales azucareros.

Objetivo. Crear una aplicación que permita evaluar alternativas de parques de bioenergía en centrales azucareros, mediante un modelo general conceptual.

Materiales y Métodos. Se desarrolló una aplicación Excel, el modelo fue verificado y validado para analizar la coherencia en los valores de las variables de salida. Se realizaron ocho casos de estudio, se evaluó el impacto en las ganancias de un parque de bioenergía, se tomó como referencia un central azucarero real.

Resultados y Discusión. A partir de los casos de estudio, las alternativas más prometedoras resultaron los sistemas de generación, a partir de biomasa, con presiones y temperaturas superiores, la producción de biogás y el uso complementario de fuentes renovables, como la solar fotovoltaica.

Conclusiones. Se validó la aplicación satisfactoriamente, como una ayuda a la concepción de parques de bioenergía. Se deben continuar precisando los costos y precios, como los de vinazas y otros residuos, así como los índices de producción de las tecnologías más novedosas de generación de portadores energéticos e incluir, además, el análisis de inversiones.

Palabras clave: bioenergía, industria azucarera, portadores energéticos, fuentes renovables, diversificación.

ABSTRACT

Introduction. Sugarcane biomass and materials flows from the sugar industry and their derivatives processes have great potential as renewable energy sources, for this the interest in their use is increasing. To this end, the so-called bioenergy parks around sugar mills are conceived.

Objective. To create an application that allows the evaluation of alternatives for bioenergy parks in sugar mills, through a general conceptual model.

Materials and Methods. An Excel application was developed, the model was verified and validated to analyze the consistency in the values of the output variables. Eight case studies were carried out to evaluate the impact on the profits of a bioenergy park, using a real sugar mill as a reference.

Results and Discussion. From the case studies, the most promising alternatives were biomass-based generation systems with higher pressures and temperatures, biogas production and the complementary use of renewable sources, such as solar photovoltaic.

Conclusions. The application was successfully validated as an aid to the design of bioenergy parks. Costs and prices, such as those of vinasses and other wastes, as well as production rates of the most innovative energy carrier generation technologies, must continue to be specified, including investment analysis.

Keywords: bioenergy, sugar industry, energy carriers, renewable sources, diversification.

INTRODUCCIÓN

La situación termoenergética del país requiere, además del mantenimiento de las plantas actuales, la introducción de nuevas tecnologías para la obtención de portadores energéticos; que permitan satisfacer su demanda de energía. En Cuba existe, actualmente, el objetivo de transformar la matriz energética nacional para producir energía más limpia, diversa y eficiente (1, 2).

La diversificación del sector azucarero, a partir de la caña de azúcar, es una alternativa para la generación de energía con de fuentes renovables; esta responde al concepto de bioeconomía circular, gracias al uso de todos los subproductos y residuos del proceso, lo que reduce los impactos negativos sobre el medioambiente (3). El objetivo de este trabajo es identificar las tecnologías energéticas que existen en la actualidad a partir de fuentes renovables (4-8) e implementar un modelo conceptual en Excel, que permita seleccionar entre alternativas con criterio económico y proponer las adecuadas en cada localización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utiliza la hoja de cálculo Excel para representar el modelo conceptual general, que permita evaluar diferentes alternativas.

En ese modelo, representado en un diagrama de flujo general, se incorporan balances a partir de índices conocidos o que pueden ser calculados con otras aplicaciones de cálculo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo implementado en Excel consta de cuatro pestañas:

Pestaña 1 - Índices de producción. En ella se plasman los índices de producción, con sus respectivas unidades de medida, de los productos y subproductos de la agroindustria de la caña de azúcar, divididos por generaciones; además, consta de los índices de producción de otras fuentes que se consideran con potencial para la obtención de energía eléctrica y diversificación del esquema, como: fuente eólica terrestre, solar fotovoltaica, paja de arroz, marabú y biomasa forestal. Para la modelación se utilizan los índices encontrados en diversas publicaciones actualizadas sobre el tema.

Pestaña 2 - Cálculos de balance. En ella se muestran las fórmulas y restricciones necesarias para plantear la programación. Las restricciones fueron programadas con la función Suma-Producto de Excel para los índices de los subproductos y el volumen a producir de cada uno. Para la determinación de la venta de cada sub-producto se debe tener en cuenta el volumen del producto principal del que deriva, así como los volúmenes a producir de los demás subproductos directos y sus índices.

$$\text{Venta} = \text{Volumen a producir (producto principal)} - \text{Sumaproducto} [\text{Volumen a producir (demás subproductos), Índices de cada subproducto}] \quad \text{Ec. 1}$$

Esta venta se entiende como el volumen que estará destinado para ello y que no se emplea para la creación de ninguno de los subproductos, en caso de poseerlos.

El volumen a producir está determinado por el Solver, ya que corresponde a la celda cambiante de la programación, el Solver define cuánto de ese producto será necesario alcanzar, analizar su ganancia y volumen. Este volumen debe ser siempre menor que el volumen máximo.

El producto puede ser utilizado para venta o para obtener otros nuevos, a partir de él mismo, a esta parte que no se vende se le denomina variable A otros usos, y queda calculada mediante la ecuación 2:

$$\text{A otros usos} = \text{Volumen a producir} - \text{Destinado a venta} \quad \text{Ec.2}$$

Se determina el costo de cada producto mediante la ecuación 3 y el costo total con la ecuación 4.

$$\text{Costo total de cada producto} = \text{Venta} * \text{Costo unitario} \quad \text{Ec.3}$$

$$\text{Costo Total} = \sum \text{Costo total de cada producto} \quad \text{Ec.4}$$

El ingreso total de cada producto se determina con la ecuación 5 y los ingresos totales con la ecuación 6.

$$\text{Ingreso total de cada producto} = \text{Venta} * \text{Precio unitario} \quad \text{Ec.5}$$

$$\text{Ingreso Total} = \sum \text{Ingreso total de cada producto} \quad \text{Ec.6}$$

Los costos y precios unitarios fueron sacados de las fichas de costo, resoluciones y de la literatura. Los precios de los alcoholes, en las destilerías, fueron extraídos de la ficha de costo de un central azucarero existente y de la resolución 28 para productores (9).

Luego de establecidos los costos y precios de cada producto se determina la ganancia producida mediante la ecuación 7, además se agregan al Excel dos ecuaciones con el porcentaje de ganancia aportado y el porcentaje del ingreso aportado, ecuaciones 8 y 9 respectivamente, como una forma de ver qué porcentaje representa cada producto del total.

$$\text{Ganancia producida} = \text{Venta} * (\text{Precio unitario} - \text{Costo unitario}) \quad \text{Ec.7}$$

$$\text{Porcentaje de ganancia aportado} = \frac{\text{Ganancia producida}}{\text{Total de ganancia producida}} * 100 \quad \text{Ec.8}$$

$$\text{Porcentaje de ingreso aportado} = \frac{\text{Ingreso Total de cada producto}}{\text{Ingreso Total}} * 100 \quad \text{Ec.9}$$

Se encuentra además una celda que contiene la capacidad excedente, calculada mediante la ecuación 10, la que permite ver que parte de la capacidad no fue utilizada o mostrar que tanto se está explotando la capacidad actualmente.

$$\text{Capacidad excedente} = V_{\text{max}} - \text{Venta} - \text{A otros usos} \quad \text{Ec.10}$$

El volumen máximo corresponde al máximo que se puede producir utilizando los índices de producción y el volumen total del producto del que deriva.

Pestaña 3 - Diagrama de flujo. Como su nombre indica, en ella se representa el esquema del modelo, de modo que pueda verse de manera general lo que se genera en la industria, en los determinados casos. La pestaña se encuentra vinculada a la hoja Cálculos de balances, a las celdas de los volúmenes a producir, celda variable del Solver.

Para la generación de electricidad, a partir de bagazo, se consideran dos niveles de electricidad: en la primera o nivel A están consideradas las calderas de 18 y 28 bares, mientras que en la segunda o nivel B están consideradas las calderas que trabajan a 42, 60 y 80 bares.

Pestaña 4 - Costos y precios. Es una base de datos de costos y precios encontrados en las fichas de costos, resoluciones de AZCUBA (9) y el Ministerio de Finanzas y Precios (MFP), así como otras referencias oficiales y la literatura.

Verificación y validación del modelo

Debido a la creación de este modelo es necesario verificar y validar que esté correctamente programado en la hoja de Excel, para comprobar que muestre resultados reales.

Primeramente se procede a la verificación, se dan valores extremos (0 - 1) a las variables de entrada o independientes y se prueban en el modelo programado, en la hoja de cálculo de Excel, que debe responder a estos cambios, con valores lógicos y consecuentes en las variables de salida o dependientes. En este caso, se da valor 0 a la variable de entrada, que es el volumen de caña y se analizan las variables de salida, que son el volumen a producir de los distintos subproductos.

También se analizan las respuestas, para determinar si muestran valores lógicos, en este caso se aumenta el valor del precio unitario del etanol de segunda generación, a partir de bagazo, que anteriormente no se producía para verificar si el programa reacciona de manera adecuada. Se aumenta el precio de venta desde 1 368 CUP/hL de etanol 2G hasta 4 000 CUP/hL.

Luego se procede a la validación del modelo con resultados de la herramienta LERB (10) con módulos de las etapas del proceso, usada en un central existente y se prueba el Excel en las mismas condiciones de entrada, volumen de caña en toneladas por día y se observa una de las variables de salida; en este caso, se realizará con la cachaza, bagazo, mieles, residuos agrícolas de la cosecha (RAC) y vinaza que se produce en el proceso. Si la herramienta muestra un error relativo menor al 10 % se considera que es confiable.

Volumen de caña: 6 900 t/día

El error relativo se determina utilizando la ecuación 11:

$$\text{Error de validación (\%)} = \left| \frac{\text{Caso base} - \text{Caso real}}{\text{Caso base}} \right| \cdot 100 \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

Caso base: Resultados de la herramienta LERB (5)

Caso real: Resultados del modelo

Simulación de diferentes alternativas

Se analizan diferentes escenarios con la aplicación Excel desarrollada. El caso de estudio base que se analiza se corresponde con un central azucarero que muele 350 mil t de caña en la zafra y tiene una destilería anexa de 500 hL/día. Este central azucarero produce azúcar crudo y genera electricidad para cubrir sus requerimientos y exportar el exceso a la red nacional. Puede vender, también, otros materiales del proceso como bagazo, cachaza y mieles. La electricidad se genera en dos calderas de 60 t de vapor por h, a 18 bares de presión y 320 °C, que utilizan como combustible el bagazo y los RAC. Posee tres turbogeneradores de 4 MW cada uno.

Se describen, además, los escenarios que se estudian, con el propósito de convertir este complejo industrial en un parque de bioenergía. Para todos los casos, se ha considerado un grupo de datos comunes, que se ha obtenido de los reportes de laboratorio y de la simulación de un día de trabajo de este ingenio de 6900 t por día de capacidad de molida. En los escenarios se han considerado las instalaciones existentes y se ha supuesto la existencia de nuevas instalaciones, para definir la conveniencia o no de nuevos surtidos de productos en este complejo agroindustrial. No se han considerado los valores de inversión, lo que se estudia es la operación.

Escenario 1. Producción de azúcar crudo y electricidad

Se considera el central azucarero que produce crudo y genera electricidad. No se envían materiales azucarados a la destilería.

Escenario 2. Producción de azúcar refino y electricidad

En este escenario se considera que la empresa tiene, además, una refinería de azúcar adjunta al central azucarero de crudo.

Escenario 3. Producción de azúcar crudo y electricidad con parámetros de vapor superiores

Se ha supuesto trabajar con una caldera y turbo de mejores prestaciones y parámetros altos en el vapor (67 bares y 520 °C), que permitan generar 90 kWh y más por tonelada de caña. Es un caso de las llamadas bioeléctricas.

Escenario 4. Producción de azúcar, aguardiente y electricidad

La destilería se incluye en este escenario, pero no se ha considerado la generación tipo bioeléctrica ni la producción de refino.

Escenario 5. Producción de azúcar, alcoholes, biogás de vinaza y electricidad

La destilería se incluye en este escenario y se incorpora la producción de biogás a partir de las vinazas, pero no se ha considerado la generación tipo bioeléctrica ni la producción de refino.

Escenario 6. Producción de biogás de varios sustratos

En este escenario se incluye la posibilidad de producir biogás a partir de varios sustratos, no sólo de vinazas, que es ya una tecnología conocida en Cuba. Se incluyen bagazo, RAC y cachaza, que demandan tecnologías más modernas no extendidas en el país.

Escenario 7. Producción de todos los portadores energéticos

En este caso se considera la posibilidad de producir etanol de segunda generación, hidrógeno y también generar electricidad a partir de biogás y marabú.

Escenario 8. Incorporación de otras fuentes renovables de energía

En este escenario se considera la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, además de los anteriores portadores.

Verificación y validación

El programa muestra valores razonables en las pruebas de verificación y validación realizadas, y se obtuvieron resultados lógicos. En el caso de la validación, se calculó el error relativo para varias etapas del proceso de producción: azúcar crudo, bagazo y cachaza y se obtuvieron 1.93 %, 11.29 % y 16.04 %, respectivamente. Los errores se encuentran un poco alejados entre sí, esto se debe a que la herramienta LERB (10) utiliza balances de masa y energía detallados para el central azucarero; y, sin embargo, esta herramienta se basa en índices de la literatura. Si se realiza un promedio entre estos errores, se obtiene un error relativo promedio de 9.75 % para la herramienta.

El resumen de los principales resultados económicos de todos los escenarios se muestra en la tabla 1, en la que solo se analizan los valores de ganancia generados con cada uno de los escenarios.

Sin dudas, la diversificación de los portadores energéticos que se han incorporado para convertir estas instalaciones en un parque de bioenergía, todos a partir de corrientes de los propios procesos de la agroindustria, permite alcanzar mayores ganancias en un monto tal que podrían soportar,

probablemente, la recuperación de las inversiones que se acometerán, pues muchas de estas tecnologías no están implementadas actualmente en el país.

Tabla 1. Resultados para cada escenario analizado

| Escenario | Productos principales | Costo (CUP) | Ingreso (CUP) | Ganancia (CUP) |
|-----------|---|-----------------|------------------|------------------|
| 1 | Azúcar crudo y electricidad | 341 170 586. 37 | 443 703 422. 22 | 102 532 835. 86 |
| 2 | Azúcar refino y electricidad | 377 093 235. 37 | 480 046 396. 72 | 102 953 161. 36 |
| 3 | Azúcar crudo y electricidad (bioeléctrica) | 358 028 017. 17 | 485 500 507. 62 | 127 472 490. 46 |
| 4 | Central y destilería actual | 414 194 927. 73 | 522 533 367. 74 | 108 338 440. 02 |
| 5 | Incorporación de biogás de vinaza | 414 265 435. 67 | 522 642 130. 00 | 108 376 694. 33 |
| 6 | Incorporación de biogás de varios sustratos | 625 314 570. 47 | 837 430 027. 90 | 212 115 457. 43 |
| 7 | Incorporación de todos los productos | 182 935 647. 44 | 416 189 519. 21 | 233,253,871.77 |
| 8 | Incorporación de otras fuentes de energía renovable | 606 484 363. 03 | 1 870 855 294.12 | 1 264 370 931.08 |

CONCLUSIONES

1. Se concibió e implementó una aplicación Excel para estudiar las mejores opciones de producción de portadores bioenergéticos en un central azucarero.
2. Se propone un modelo de parque de bioenergía en Cuba, con nuevas tecnologías para la producción de biogás, a partir de diferentes sustratos originados en el proceso agroindustrial y sistemas de generación de vapor de presiones y temperaturas más altas.
3. El modelo implementado en Excel fue verificado de manera correcta y muestra resultados lógicos. El error relativo de validación promedio está cerca del límite del rango permisible del 10 % de confianza, debido a que pueden haber diferencias importantes en los índices usados en diferentes centrales azucareros.
4. Se realizaron ocho casos de estudio con la herramienta desarrollada, lo que permitió identificar las tecnologías de producción de portadores energéticos que mejoran la economía de un parque de bioenergía, se tomó como referencia un central azucarero real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arias, G. *La fábrica de azúcar de caña: fuente de energía renovable. Generación y consumo de vapor, agua y electricidad*. Primera edición revisada. Estados Unidos: Amazon. 2020.
2. Sabadí, R. Diversificación de la industria azucarera y bioeconomía circular: las rutas de la energía. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar, 2023. 57 (1). <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2023/03/articulo-2-1.pdf>
3. Ruíz, M.; et al. Oportunidades de la generación de energía en la matriz energética cubana desde un enfoque de ciclo de vida. *Centro Azúcar*, 2023, 50 (1), enero-marzo 2023. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v50n1/2223-4861-caz-50-01-e1012.pdf>. Consultado 30/5/2023.

4. Díaz, M. *Biogás de subproductos de la caña de azúcar*. En: *Resultados de los institutos cubanos de investigación, desarrollo e innovación en las tecnologías sobre azúcar y derivados*. La Habana, ICIDCA, 2019. pp. 470-478.
5. García, E. *Análisis de alternativas de centrales energéticas cañeras en Cuba*. [Trabajo de diploma]. Universidad central Marta Abreu, Las Villas (2006) <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/2785>.
6. Gomes-da Silva, Z. M.; *et al.* Análisis de alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. *Centro Azúcar*, 2022, Vol 49, No.2, pp:15-25.
7. Ospina, L.; Manotas-Duque, D.; Ramirez, H. D. Desafíos y oportunidades de la vinaza de caña de azúcar. Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y Competitividad*, 2022, 25 (1). doi:10.25100/iyv.v25i1.12144.
8. GenH2, S. (2022). Defining the Hydrogen Economy from A to Z: T is for 1TPD. Washington, USA <https://genh2hydrogen.com/hydrogen-from-a-to-z-t-for-1tpd/>, página web consultada 30/5/2023.
9. García Pérez, J. A. (2023). Resolución 28 del 9/5/2023. AZCUBA. Cuba.
10. Rostgaard, L. (2018). Aplicación Excel Balances LERB. Desarrollada y presentada en el Fórum de Ciencia y Técnica. ICIDCA, La Habana, Cuba.