

Análisis emergético para la combustión de bagazo en un central azucarero

Emergetic analysis for bagasse combustion in a sugar mill

Reinier Jiménez Borges^{1,*}, Alejandro Valdés López¹, Dianelis Díaz Marcos², Dayana Rabassa Rabassa³

¹Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas Km 4. Cienfuegos, Cuba.

²Departamento de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas Km 4. Cienfuegos, Cuba.

³Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), Carretera del Castillo de Jagua, Km 1,5. 59350. Ciudad Nuclear. Cienfuegos, Cuba.

*Autor de correspondencia: rjborges@ucf.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 6 julio 2020 **Aceptado:** 24 agosto 2020 **Publicado:** 1 septiembre 2020

Resumen

En el trabajo se evalúa la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo a partir de la caña de azúcar de un central azucarero, con el fin de contribuir a una agricultura sostenible. De la metodología emergética utilizada se evaluaron las corrientes de entradas y salidas del proceso agro-industrial. Como resultado se determinó que el 53,26% de la emergía del proceso proviene de la economía y el 46,74% de los recursos naturales. Se cuantificaron las transformidades de los principales productos de la fábrica estudiada: 1,6501E+08 seJ/J para el azúcar crudo y 3,4664E+06 seJ/J para la electricidad. Se determinó además la emergía específica de otros co-productos importantes como son: 2,3965E+09 seJ/g para el bagazo; 1,6389E+11 seJ/g para la miel final y 1,0415E+10 seJ/g para la cachaza lo que es significativo para posteriores estudios en la industria de derivados. El índice de sostenibilidad emergética (ESI) calculado fue 1,11 que indica que el sistema presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo. El índice de carga ambiental (ELR) estimado fue de 1,70, mostrando que el proceso posee un bajo impacto ambiental en comparación con otros procesos; el índice de rendimiento emergético (EYR) de 1,88 reveló que existe una gran contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema, además de un alto beneficio económico. A partir de estos resultados, se recomienda evaluar el sistema considerando la disminución del empleo de los fertilizantes tradicionales y aumentar la producción de electricidad.

Palabras clave: emergía, indicadores emergéticos, industria azucarera, sostenibilidad, transformidad.

Abstract

The work evaluates the sustainability of the production of raw sugar from sugar cane in a sugar mill, in order to contribute to sustainable agriculture. From the emergy methodology used, the inflows and outflows of the agro-industrial process were evaluated. Resulting of the methodology, it was determined that 53.26% of the emergy of the process comes from the economy and that 46.74% from natural resources. The transformity of the main products of the factory were

quantified as: $1.6501E+08$ seJ/J for raw sugar and $3.4664E+06$ seJ/J for electricity. The specific energy of other important co-products was also determined such as: $2.3965E+09$ seJ/g for bagasse, $1.6389E+11$ seJ/g for the final honey and $1.0415E+10$ seJ/g for cachaza. The results are significant for further studies focused on the industry derivatives. The calculated energy sustainability index (ESI) was 1.11, which indicates that the system has a sustainable contribution to the economy during medium-term periods. The estimated environmental load index (ELR) was 1.70, showing that the process has a low environmental impact compared to other processes: The Energy Performance Index (EYR) of 1.88 revealed that there is a great contribution of local resources (renewable and non-renewable) to the system, in addition to a high economic benefit. Based on these results, it is recommended to evaluate the system considering the decrease in the use of traditional fertilizers and the increase in electricity production.

Keywords: energy, energy indicators, sugar industry, sustainability, transformity.

1. Introducción

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible presenta una visión ambiciosa del desarrollo sostenible e integra sus dimensiones económica, social y ambiental. Dentro de sus 17 objetivos, se reconocen metas que requieren energías no contaminantes. La energía es central para todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente; ya sea para los empleos, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental [1]. El país cuenta con un ambicioso programa de alcanzar el 14% de la generación de electricidad a partir de la biomasa en el 2030. Esta cifra permitirá alcanzar en un futuro soberanía energética y más aún si se considera que la misma está basada solo en el programa de bioeléctricas en el sector azucarero y no considera el potencial del biogás, los residuos sólidos urbanos y los residuos agroindustriales y forestales. Sin embargo, este desarrollo en la agroindustria azucarera inevitablemente ha traído consigo severos daños al medio ambiente. Por tanto, el reto en la actualidad consiste en lograr su sostenibilidad integrando las actividades humanas a los ciclos de la naturaleza.

En este sentido se han realizado varios estudios. Entre los más importantes se encuentra la transformación de las fábricas de azúcar a biorefinerías. Sin embargo, como estos procesos de reestructuración requieren de inversiones, es de interés conocer la sostenibilidad del proceso agroindustrial azucarero existente. Para ello existen varias metodologías entre las que se encuentran el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), la Huella Ecológica (Ecological Footprint), la Huella Hídrica (Water Footprint) y el Análisis Multivariado. Sin embargo, en la actualidad la Metodología Emergética se ha convertido en una alternativa adecuada a esta problemática, una vez que relaciona todas las fuentes de energía, recursos materiales y servicios humanos. Ya en Cuba se han realizado investigaciones en este tema [2-3].

Con el propósito de expandir las investigaciones emergéticas en Cuba y obtener un criterio más general de la actualidad azucarera cubana, en el presente estudio se realiza la evaluación ambiental del proceso de combustión del bagazo desde el punto de vista emergético en un central azucarero.

2. Materiales y Métodos

Para el análisis fue enmarcado espacialmente la investigación a las zonas correspondientes a la fase agrícola e industrial del central azucarero objeto de estudio, considerando como base para el análisis de los flujos emergéticos el año 2019. Se evaluó la actividad cañera, el proceso de

fabricación de azúcar y el bloque de cogeneración en el año, dada la actualidad que le aporta a la investigación el empleo de datos de la zafra más reciente al iniciar la investigación; de ahí que los datos contemplados correspondieron a promedios calculados por la entidad al cierre del mismo. Las especificidades territoriales y de los sistemas termodinámicos se basaron en la información obtenida de entrevistas con agricultores del proceso y con trabajadores de la industria azucarera. La delimitación facilita la identificación de las corrientes de entrada/salida del sistema y su interrelación.

Para la elaboración de los balances energéticos (BE) del sistema, debido a su complejidad manualmente, se utilizó el simulador Sistema TermoAzúcar STA 4.1 versión docente. El mismo se encuentra disponible en la intranet de algunas universidades de Cuba. El software permite la evaluación de los sistemas termoenergéticos (STE) en fábricas de azúcar crudo, es flexible para representar los distintos STE, incorporar nuevos módulos de cálculo y permite analizar gran cantidad de información en las corrientes y los equipos del proceso.

Para la realización de los BE se actualizó la información respecto a los flujos másicos, temperatura, presión y composición de las corrientes del proceso, además de las condiciones de operación de los equipos. Una de las peculiaridades de este software es que permite obtener mucha información en cuanto a indicadores termoenergéticos globales y por áreas del sistema. Por consiguiente, fueron seleccionados aquellos que respondían a los objetivos de esta investigación centrándose principalmente en la determinación de flujos de salida del sistema como aquellos que cuantifican las pérdidas energéticas en el proceso. Una vez limitados los términos de espacio y tiempo, se identificaron las corrientes entrantes y salientes del sistema enmarcado, de modo que se tuvieron como flujos de entrada: la radiación solar, las precipitaciones, los procesos geológicos (evapotranspiración y pérdida del suelo), los combustibles, los fertilizantes, los herbicidas, la maquinaria agrícola, la labor humana, productos químicos y los servicios adquiridos de la economía, mientras que las salidas: azúcar, electricidad, bagazo, miel final y cachaza. Se consideraron las corrientes de salida como co-productos porque es imposible la producción independiente de cada uno. Para producir azúcar crudo es necesario combustionar el bagazo en el bloque de cogeneración para el autoabastecimiento de vapor y electricidad, además de la obtención de miel y cachaza, así como otros co-productos de la industria azucarera.

Modelación del sistema agro-industrial

Para la modelación se clasificaron las principales corrientes de entradas al sistema en recursos renovables [R], recursos no renovables [N], materiales de la economía [M] y servicios [S]. En las Tablas 1 y 2 se muestran los flujos de estas corrientes con su correspondiente clasificación.

Tabla 1. Ecuaciones de los principales insumos del sistema agro-industrial

No.	Ecuaciones
(1)	$E_{sol} = \text{Área} \cdot \text{Insolación promedio} \cdot (1 - \text{albedo})$
(2)	$E_{ll} = \text{lluvia} \cdot \text{Área} \cdot \rho(\text{H}_2\text{O}) \cdot E_{\text{Gibbs}}(\text{H}_2\text{O}) \cdot (1 - \text{escorrentía})$
(3)	$E_{ev} = \text{Evapotranspiración} \cdot \text{Área cañera} \cdot 2,47 \text{ acre/ha}$
(4)	$E_{p\acute{e}rdida} = \text{P\acute{e}rdida de suelo} \cdot \text{Materia Org\acute{a}nica (MO \%)} \cdot \text{Energ\acute{a}MO} \cdot 4186 \text{ J/kcal}$
(5)	$E_{comb} = C_c \cdot PC$; siendo C_c (consumo de combustible) y PC (poder calórico)
(6)	$\text{Consumo anual} = \text{flujo de fertilizante} \cdot \frac{M(\text{ingrediente activo})}{M(\text{fertilizante})}$
(7)	$E_{agroqu\acute{e}} = \text{consumo de agroqu\acute{e}micos (litros)} \cdot \rho_{agroqu\acute{e}} \text{ (g/l)}$
(8)	$E_{mo} = \frac{\text{cantidad de trabajadores}}{365} \cdot \frac{\text{d\acute{a}os}}{\text{a\~{n}o}} \cdot 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{d\acute{a}os}} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kcal}}$
(9)	$\text{Electricidad} = \frac{\text{kWh}}{\text{t de ca\~{n}a}} \cdot \frac{\text{t ca\~{n}a}}{\text{a\~{n}o}} \cdot \frac{3.6 \cdot 10^6 \text{ J}}{\text{kWh}}$

Tabla 2. Clasificación de los principales insumos del sistema agro-industrial

Insumos	Unidad	Ecuación	Clasificación
Radiación Solar	J/año	(1)	R
Precipitaciones	J/año	(2)	R
Evapotranspiración	J/año	(3)	R
Pérdida del suelo	J/año	(4)	N
Combustibles fósiles	g/año	(5)	M
Fertilizantes	g/año	(6)	M
Herbicidas, fungicidas e insecticidas	g/año	(7)	M
Labor humana	J/año	(8)	S
Energía eléctrica comprada	J/año	(9)	S

3. Resultados y Discusión

A partir de esta información y las características del esquema tecnológico se construyó el diagrama emergético como se observa en la Fig.1.

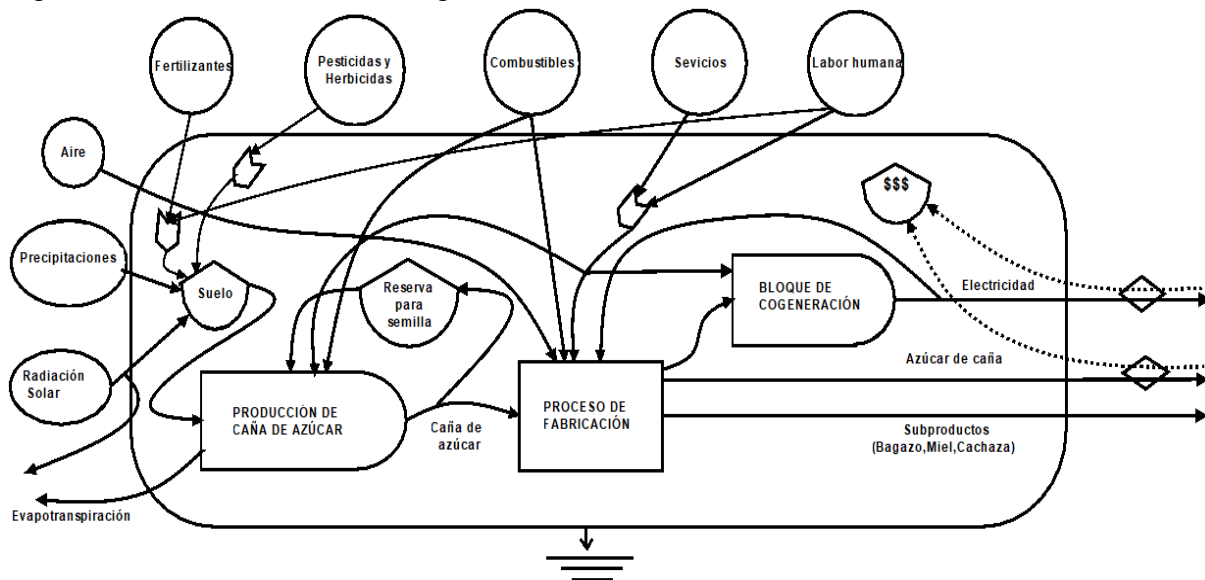


Fig.1 Diagrama emergético del sistema agro-industrial

Este diagrama permite simplificar las complejidades del sistema para visualizar las interrelaciones de las corrientes de entradas, así como características internas. Por ejemplo, se puede observar que no toda la caña obtenida del proceso de producción de caña de azúcar es transportada hacia la fábrica. Parte de esta no se muele y es dejada para semilla con la función de ser reutilizada en futuras cosechas. Otra parte permanece en el campo con el objetivo de que alcance un mayor grado de maduración, para obtener altos rendimientos en la próxima zafra. La caña utilizada para la producción de azúcar crudo, es vendida al central por las diferentes formas productivas, transformándose en un producto terminado generando recursos monetarios que se utilizan para la compra de nuevos activos. Los fertilizantes presentes en el suelo son fundamentalmente los del tipo nitrogenado. La labor humana fue considerada, aunque esta no constituye un puesto clave debido a que los procesos agro-cañeros actuales son mecanizados utilizando en menor escala la fuerza de trabajo humana. Los residuos agrícolas cañeros (RAC) constituyen un co-producto de la Fase Agrícola; no se representan a la salida del mismo en conjunto con la caña de azúcar, pues se reutilizan en el proceso para el mejoramiento y protección del suelo. Finalmente, del sistema agro-industrial se obtiene como producto el azúcar crudo para la exportación generando una fuente de ingresos y para el consumo nacional como co-productos. El bagazo es utilizado en el bloque de

cogeneración permitiendo el autoabastecimiento energético en forma de electricidad y vapor. La cachaza se usa como fertilizante en la preparación del suelo para cosecha de la caña de azúcar y las mieles se venden como materia prima para la producción de alcohol y sus derivados.

Resultados del balance energético

En la Tabla 3. Se muestran los indicadores seleccionados del STA. El rendimiento industrial obtenido fue de 16,19%. Sin embargo, para el BE el software solo considera la cantidad de sacarosa (% pol) contenida en caña y no otros factores importantes como el contenido de materias extrañas, ni las reacciones de inversión lo que constituye una limitante del análisis. Teniendo en cuenta lo anterior, para obtener con mayor veracidad los resultados del estudio, se tomó el rendimiento real igual a 9,61% equivalente a 41 544 toneladas de azúcar entre las 432 301 toneladas de caña molidas por el central en estudio al cierre del 2019. Por último, en el BE realizado se obtienen aproximadamente 4,15E+10 g de azúcar, 9,3939E+10 g de bagazo sobrante, 1,3736E+09 g de miel final, 2,1615E+10 g de cachaza y 6,49E+13 J de electricidad; todos referidos a la zafra 2018-2019. Estos valores representan los productos y co-productos del sistema.

Tabla 3. Resultados de la simulación

Indicadores	Valor	Unidades
Producción eléctrica específica de la fábrica	53,65	kWh/t de caña
Demanda eléctrica específica de la fábrica	11,92	kWh/t de caña
Electricidad vendida al SEN	41,73	kWh/t de caña
Rendimiento industrial	16,19	%
Tasa de evaporación del múltiple efecto	23,63	kg/h·m ²
Economía del área de evaporación	2,54	adimensional
Pérdidas de calor de evaporación al condensador barométrico de múltiple efecto	122,95	% demanda de escape del proceso
Pérdidas de calor en evaporaciones a condensadores barométricos de casa de calderas	19,21	% demanda de escape del proceso
Bagazo disponible	29,8	% flujo másico en caña
Bagazo sobrante	21,73	% flujo másico en caña
Miel final	3,18E-01	% flujo másico en caña
Azúcar producida	16,19	% flujo másico en caña

Resultados de la tabla emergética

El análisis emergético es un método de contabilidad ambiental en el que se estima la energía que entra al sistema para el cálculo de las llamadas bases emergéticas. El cambio de base responde al hecho que en los estudios iniciales se usaba la base emergética 9,44 E+24 seJ/año [4] pero en [5] esta fue actualizada a 15,83 E+24 seJ/J. Por lo tanto, se recomienda que para usar resultados previos a la actualización de la nueva base (15,83E+24 seJ/J) se debe multiplicar las transformidades por 1,68. Para la obtención de los resultados correspondientes a la tabla emergética primero fueron identificadas las unidades de valor emergético de las principales corrientes de entrada al sistema. En las Tablas 4 y 5 correspondientes a la fase agrícola e industrial del proceso correspondientemente se pueden observar, apareciendo señaladas con el símbolo (*) aquellas que hubo que cambiar de base multiplicándolas por el coeficiente 1,68.

Una vez conocidos los flujos de las principales corrientes (Tablas 1 y 2) y sus transformidades (Tablas 4 y 5) se procedió a la elaboración de la tabla emergética para el sistema objeto de estudio. Hay que destacar que previamente fue necesario realizar un análisis dimensional para evitar incongruencias al determinar la emergía de cada insumo.

Tabla 4. Unidades de valor emergético usadas en la Fase Agrícola

Transformidad	Valor	Unidad	Referencias
Sol	1	seJ/J	Por definición
Lluvia *	1,80E+04	seJ/J	[5]
Evapotranspiración *	15 423	seJ/J	[4]
Pérdida del suelo *	7,38E+04	seJ/J	[4]
Diésel	2,83E+09	seJ/g	[6]
Gasolina	2,92E+09	seJ/g	[6]
Maquinaria Agrícola	1,12E+10	seJ/g	[7]
Potasio *	1,85E+09	seJ/g	[5]
Fósforo *	2,20E+10	seJ/g	[8]
Nitrógeno *	2,41E+10	seJ/g	[8]
Herbicidas, fungicidas e insecticidas *	1,48E+10	seJ/g	[5]
Labor humana	3,93E+06	seJ/J	[8]

Tabla 5. Unidades de valor emergético usadas en la Fase Industrial

Transformidad	Valor	Unidad	Referencia
Aire	9,82E+02	seJ/J	[9]
Agua *	3,23E+05	seJ/g	[9]
Grasas y aceites lubricantes	6,60E+04	seJ/g	[10]
Ácido clorhídrico *	3,64E+09	seJ/g	[11]
Sosa cáustica *	1,90E+09	seJ/g	[11]
Fosfato trisódico	9,35E+09	seJ/g	[8]
Otros productos químicos	3,80E+08	seJ/g	[10]
Servicios no renovables	4,60E+12	seJ/\$	[10]
Energía eléctrica comprada	3,40E+05	seJ/J	[7]

Si se analiza el sistema en estudio por separado, se puede comprobar que en la Fase Agrícola el principal flujo emergético corresponde a los materiales de la economía con un 57,77% (Fig.2). De ellos el consumo de fertilizantes, principalmente los nitrogenados, constituye un valor de emergía significativo al proceso agro-cañero (Fig.3). Si bien los fertilizantes representan los flujos emergéticos de mayores porcentajes, no se puede dejar de señalar la labor humana, aunque no representa un elevado valor debido a que los procesos agro-cañeros actuales son mecanizados utilizando en menor escala la fuerza de trabajo humana. Seguidos de estos con un 29,3% se encuentran los recursos renovables de la naturaleza, indicando que el proceso no explota de manera significativo dichos recursos.

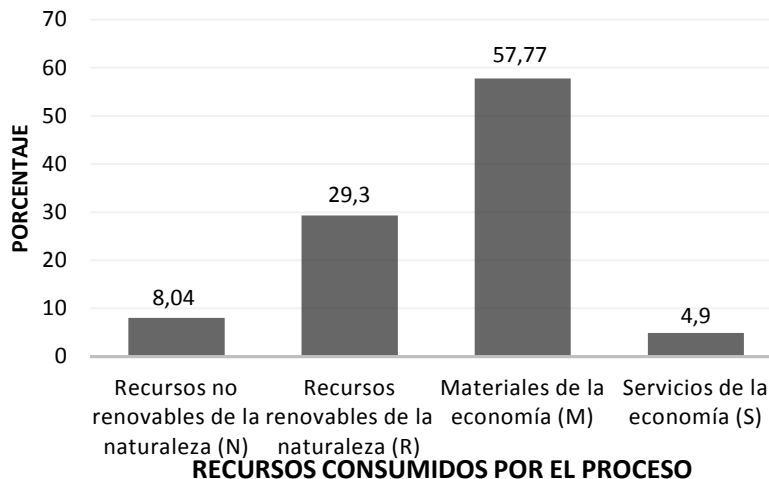


Fig.2 Proporción de la emergía total por categoría en la Fase Agrícola

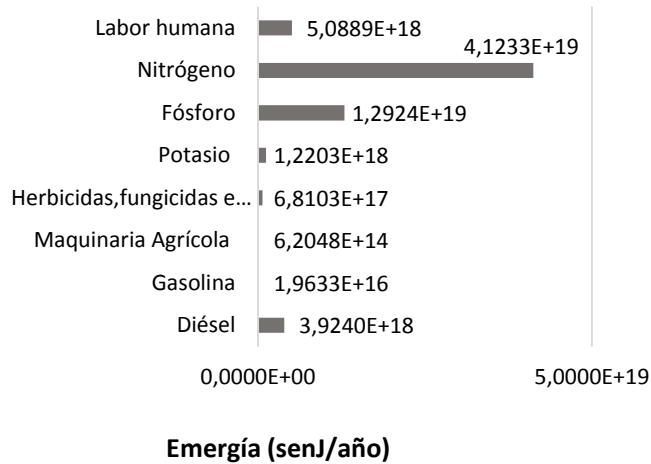


Fig.3 Consumo emergético de Materiales de la Economía en la Fase Agrícola

Al analizar la Fase Industrial, se puede observar en la Figura 4 que el principal flujo emergético corresponde a los recursos renovables de la naturaleza con un 43,77%, debido al alto valor emergético de 5,3029E+19 seJ/año del aire. Esto ocurre debido a la gran cantidad de aire utilizado por el bloque de cogeneración. Además, con un 44,11% se encuentran los servicios de la economía. Este valor relativamente alto está principalmente debido a los servicios que el sistema debe importar de la economía local, destacándose que aunque el sistema es capaz de generar electricidad, aun así necesita un suministro de la red, de los flujos de entrada que integran los servicios y representan el valor de emergía más significativo de dicha fase, con 2,46E+19 seJ/año (Fig.5).

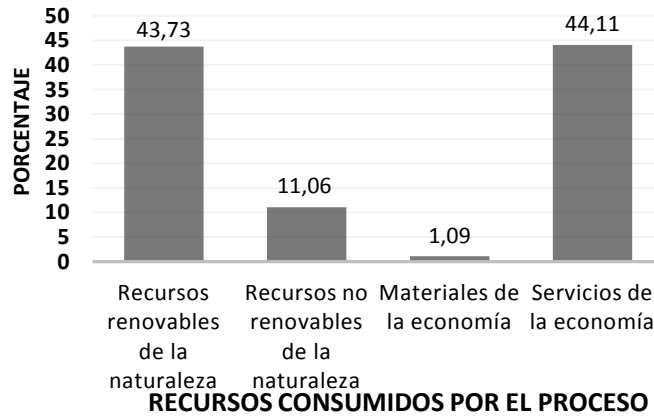


Fig.4 Proporción de la emergía total por categoría en la Fase Industrial

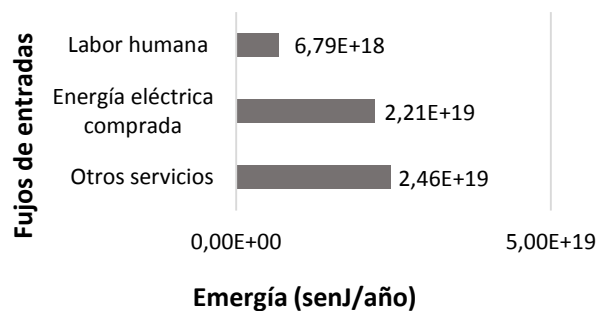


Fig.5 Consumo emergético de Servicios no renovables en la Fase Industrial

El principal flujo energético del proceso agro-industrial proviene de la economía ($1,1990E+20$ seJ/año) representando un 53,26% de la energía total mientras que el aporte de la naturaleza ($8,3459E+19$ seJ/año) representa el 37,07%. En la Fig.6 se puede ver la relación porcentual de las cuatro categorías analizadas, donde los recursos renovables de la naturaleza representan el mayor aporte energético y los servicios no renovables de la naturaleza el menor. Esto se debe al desarrollo de técnicas de cultivo que aprovechan en mayor medida los recursos más económicos y naturales.

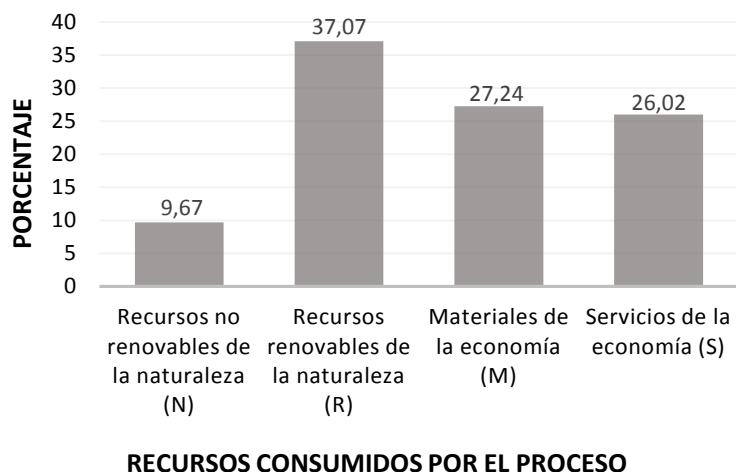


Fig.6 Proporción de la energía total por categoría

Resultados del cálculo y análisis de los indicadores energéticos

El cálculo de los indicadores energéticos permiten caracterizar los sistemas y al compararlos determinar cuáles son más eficientes en el aprovechamiento de los recursos, siempre dentro de los criterios y limitaciones del método. El factor significativo de estos es que consideran no solo los recursos naturales de los ecosistemas sino también la labor humana y la retroalimentación de la economía. En la Tabla 6 se muestran las fórmulas para su cálculo y una breve descripción de su interpretación.

Tabla 6. Indicadores energéticos

Indicadores	Fórmula	Unidades	Interpretación
Energía de fuentes renovables	R	seJ/año	Entrada de energía de fuentes renovables
Energía de fuentes no renovables	N	seJ/año	Entrada de energía de fuentes no renovables
Energía importada de la economía	F	seJ/año	Entrada de energía de fuentes externas (usualmente con un intercambio monetario)
Energía usada por el sistema	$Y=R+N+F$	seJ/año	Costo energético del sistema
Transformidad (Tr)	Y/E	seJ/J	Relación entre la energía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (E).
Razón de renovabilidad (%R)	R/Y	-	A largo plazo, solo sistemas con un alto valor son sostenibles
Razón de eficiencia energética (EYR)	$(R+N+F)/F$	-	Es deseable un valor elevado ($EYR > 2$) pero de ser muy elevado puede significar una explotación excesiva de recursos naturales
Razón de carga ambiental (ELR)	$(N+F)/R$	-	Valores bajos indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental
Índice de sostenibilidad energética (ESI)	EYR/ELR	-	Cuando $1 < ESI < 5$ se contribuye moderadamente a la economía y un $ESI > 5$ indica que el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. Cuando el $ESI > 10$ se considera el proceso como subdesarrollado.

Transformidad y emergencia específica

Los productos obtenidos y sus unidades de valor emergético (UEV) se muestran en la Tabla 7. Hay que destacar que los principales productos del sistema son el azúcar crudo y la electricidad y que aunque se consideró el bagazo, la miel final y la cachaza como co-productos, no se deben utilizar sus emergencias específicas para efectuar comparaciones, debido a que todavía necesitan procesamiento para convertirse en productos útiles a la economía. A pesar de esto, conocer estos valores es un aporte significativo para posteriores investigaciones en la industria de los derivados.

Tabla 7. Transformidades y emergencias específicas de los productos del proceso

Producto	Producción	Transformidad (seJ/J)	Emergencia específica (seJ/g)
Azúcar (g/año)	4,15E+10	1,6501E+08	5,4188E+09
Bagazo (g/año)	9,39E+10	-	2,3965E+09
Miel final (g/año)	1,37E+09	-	1,6389E+11
Cachaza (g/año)	2,16E+10	-	1,0415E+10
Electricidad (J/año)	6,49E+13	3,4664E+06	-

La segunda regla del álgebra emergética establece que el azúcar y la electricidad poseen igual emergencia (se ha utilizado igual cantidad de energía para su producción), pero el contenido energético de estos es diferente, siendo mayor para la electricidad en su menor transformidad. En base a este resultado parece lógica la producción de electricidad en la fábrica como un elemento imprescindible para lograr mayor eficiencia y sostenibilidad. En la Tabla 8 se muestran los indicadores emergéticos del proceso.

Tabla 8. Indicadores emergéticos del proceso

Indicadores emergéticos	Valor
%R	37,07%
EYR	1,88
ELR	1,70
ESI	1,11

Con la cuantificación del %R se pudo conocer que el proceso de obtención de caña de azúcar analizado emplea el 37,07% de emergencia renovable. Este porcentaje moderado indica la alta probabilidad de ser sostenible y sobrevivir a un estrés económico con el desarrollo y aplicación de técnicas novedosas. Esta situación se vuelve atrayente en la época actual si se tiene en cuenta que todo desarrollo contemporáneo se basa en esta premisa y que además, se está tratando una actividad productiva que pudiese trabajar con entradas renovables, casi de forma total. Se determinó un EYR de 1,88 indicando la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico. Es decir, que existe una gran contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema y además en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios. Para el caso de estudio se obtuvo un ELR de 1,70. El bajo valor de la razón de carga ambiental ($ELR < 2$) indica que el impacto ambiental del central azucarero objeto de estudio, no es tan grande en comparación con otros procesos, aunque no se puede descartar la posibilidad de que exista un área considerable para su dilución. Al calcular el ESI para la actividad cañera desarrollada en las unidades productoras asociadas al central azucarero, se obtuvo un valor igual a 1,11. Al estar este resultado en el rango $1 < ESI < 5$ se puede afirmar que el sistema contribuye moderadamente a la economía creando oportunidades para el desarrollo local. Si se toma esto en consideración con la capacidad de generar más electricidad e integrar otras facilidades auxiliares, la reconversión de la

fábrica a una biorefinería pudiera ser una alternativa a valorar. Sin embargo, es necesario trabajar primero sobre factores que inciden negativamente sobre el proceso.

4. Conclusiones

La metodología propuesta para el análisis emergético permitió establecer que este enfoque de análisis constituye una herramienta para valorar la sostenibilidad de los procesos, una vez que se logra contabilizar las entradas provenientes de la naturaleza y de la economía, permitiendo una evaluación sistémica del proceso de combustión de bagazo en el central objeto de estudio. La contabilidad emergética del sistema aportó para la Fase Agrícola que el 62,67% del consumo emergético para la obtención de caña de azúcar depende de recursos económicos y solamente el 37,34% de recursos de la naturaleza, destacándose dentro de los recursos económicos los materiales de la economía con un 57,77% como mayor consumidor. El balance emergético del sistema industrial reportó que el 54,79% de la emergencia del proceso proviene del medio ambiente y el 45,2% de la economía, por lo que existe una explotación significativa de los recursos naturales locales. Las transformidades calculadas para los principales productos fueron: 1,6501 E+08 seJ/J para el azúcar crudo y 3,4634E+06 seJ/J para la electricidad. Este resultado muestra que en la fábrica de azúcar es más eficiente la producción de electricidad que la producción de azúcar. El índice de sostenibilidad emergética (ESI) calculado fue 1,11 que indica que el sistema presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo. El principal factor que aportó a este resultado fue el alto consumo de emergencia proveniente de la economía para la producción de caña de azúcar, principal materia prima del sistema analizado.

Referencias

1. Jiménez, B.R., et al. *Evaluación preliminar del potencial energético de diferentes biomásas en la provincia de Cienfuegos*. Revista Centro Azúcar, 2018. **45**(2): p.25-32.
2. Bravo Amarante, E., et al. *La energía como indicador de economía ecológica para medir sustentabilidad*. Universidad y Sociedad, 2018. **10**(5): p.78-84.
3. Del Pozo, P.P., et al., *El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2014. **23**(4): p.59-63.
4. Odum, H.T. *Environmental Accounting (Emergy and Environmental Decision Making)* 1996. New York: John Wiley & Sons.
5. Odum, H.T. *Emergy of Global Processes. Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios* 2000.Vol.2. Center for Environmental Policy. Florida.
6. Bastianoni, S., et al., *The solar transformity of petroleum fuels*. Ecological modelling, 2009. **220**(1): p.40-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.003>
7. Brown, M., et al., *Emergy Analysis and Environmental Accounting*. *Encyclopedia of Energy* (329-354) 2004. Oxford: Elsevier.
8. Giannetti, B. F., et al., *Greening A Cuban Local Mango Supply Chain: Sustainability Options and Management Strategies*. Journal of Environmental Accounting and Management, 2016. **4**(3): p.251-266.
9. Izursa, J.L. *Emergia (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque*. Ecología en Bolivia, 2011. **46**: p.71-76.
10. Brown, M.T., et al., *Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems*. Journal of cleaner production, 2002. **10**(4): p.321-334. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)
11. Simoncini, E., et al., *Honey and sugar as surrogate products: an emergy evaluation*. Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics, 2009. **4**(2): p.143-153. <https://doi.org/10.2495/DNE-V4-N2-143-153>

Agradecimientos

Al personal de la fábrica por su tiempo, aunque su agenda de trabajo estuviese al límite.

Conflicto de Intereses

No existe ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Reinier Jiménez Borges. ORCID: 0000-0001-6451-8499

Participó en el diseño de la investigación, determinación de resultados y escritura del documento.

Alejandro Valdés López. ORCID: 0000-0002-8503-3025.

Participó en el diseño de la investigación, determinación de resultados y escritura del documento.

Dianelis Díaz Marcos. ORCID: 0000-0001-8282-633X

Participó en el diseño de la investigación, determinación de resultados y escritura del documento.

Dayana Rabassa Rabassa. ORCID: 0000-0003-3392-6486

Participó en el diseño de la investigación.