

Artículo Original

**ANÁLISIS EMERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE
ELECTRICIDAD EN UNA TERMOELÉCTRICA CUBANA**

**ELECTRICITY PRODUCTION IN A CUBAN POWER
PLANT EMERGY ANALYSIS**

Alejandro Valdés López ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>

Yoan Capote Trujillo ² <https://orcid.org/0000-0002-0902-7934>

¹ Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

² Departamento de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 3 ½, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Mayo 11, 2020; Revisado: Julio 13, 2020; Aceptado: Julio 28, 2020

RESUMEN

Introducción:

En la actualidad han surgido importantes herramientas para la cuantificación de los potenciales impactos ambientales de los procesos, productos y servicios. Entre estos la emergía, un concepto basado en la termodinámica, los principios teóricos de la ecología y la energética de sistemas, ha ganado popularidad ya que permite, entre otras cosas evaluar la relevancia del trabajo humano y los servicios bajo un marco común.

Objetivo:

El objetivo de esta investigación consiste en evaluar el potencial impacto ambiental de la producción de electricidad en Cuba tomando como caso de estudio la Central Termoeléctrica de Cienfuegos, Carlos Manuel de Céspedes.

Materiales y Métodos:

Para ello se llevó a cabo un análisis emergético que requirió un análisis documental para la identificación de las unidades de valor emergético de los principales flujos que determinan la dinámica del sistema analizado.

Resultados y Discusión:

La transformidad estimada para la electricidad es $7,9925 \text{ E}+05 \text{ seJ/J}$ que se corresponde con el orden para sistemas similares. La razón de eficiencia emergética indica una alta dependencia del sistema de los recursos no renovables e importados de la economía constituyendo el combustible más del 90 % del flujo emergético consumido. La razón



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Alejandro Valdés, Email: avlopez@ucf.edu.cu



de carga ambiental revela un elevado impacto sobre el medio ambiente por lo que el índice de sostenibilidad emergética muestra que el sistema no es sostenible a largo plazo.

Conclusiones:

Esto evidencia la necesidad de explotar otras formas de generación a partir de fuentes renovables de energía siendo atractiva en el contexto cubano la biomasa.

Palabras clave: análisis emergético; generación de electricidad.

ABSTRACT

Introduction:

Nowadays have emerged important tools to quantify the potential environmental impacts of processes, products and services. Among them energy, a concept based in thermodynamics, the theoretical principles of ecology and system energetics, have gained popularity due to it allows among other things to assess the relevance of human work and services in the same framework.

Objective:

The objective of this investigation is to assess the potential environmental impact of the electricity production in Cuba taking as a case of study the Carlos Manuel de Céspedes Power Plant located in Cienfuegos.

Materials and Methods:

To do this an emergy analysis was carried out which required an analysis of documents to identified the unit emergy values of the main flows that control the dynamics of the system analyzed.

Results and Discussion:

The transformity estimated for electricity is $7.9925 \text{ E}+05 \text{ seJ/J}$ which is in the range for similar systems The emergy yield ratio (EYR) shows a high dependence from the system of non-renewable and imported resources from economy being the fuel over 90 % of the emergy flow consumed. The environmental loading ratio (ELR) reveals a high impact to the environment which is the reason why the emergy sustainability index (ESI) indicates the unsustainability of the system in the long run.

Conclusions:

This shows the necessity to exploit other forms of generation based in renewable sources being the biomass attractive due to Cuban perspective.

Keywords: emergy analysis; electricity generation.

1. INTRODUCCIÓN

Por su relevancia el impacto ambiental de los sistemas de generación de electricidad ha sido objeto de estudio por diferentes autores en el marco del análisis emergético. Odum (1996) presenta una media global de la transformidad para la electricidad de $1,74 \text{ E}+05 \text{ seJ/J}$ analizando un conjunto de plantas localizadas en diferentes regiones geográficas y que usan como materia prima diversos combustibles y fuentes de energías renovables. Aunque este valor fue asumido para estimaciones en posteriores estudios un análisis

estadístico revela que existe una gran variabilidad en este resultado debido al elevado coeficiente de desviación estándar para los datos que presenta el autor, lo que condiciona una elevada incertidumbre. Brown y Ulgiati (2002) condujeron un estudio similar donde analizaron además de la incidencia de las diferentes formas de generación indicadores de eficiencia, impacto ambiental y sostenibilidad demostrando el menor impacto ambiental de la producción de electricidad a partir de fuentes de energía renovables. Sin embargo, estos autores no discuten que, aunque el impacto ambiental de la generación a partir de fuentes renovables es menor las capacidades instaladas de las plantas analizadas son muy pobres para la continua y creciente demanda de electricidad. El método ha sido usado además para valorar la generación de electricidad a partir del biogás (Ciotola et al., 2011), a partir de la combustión del gas proveniente de rellenos sanitarios (Pan et al., 2018), para un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC por sus siglas en inglés) o para la generación de energía a partir de calor residual (Zhang et al., 2018). Lo anterior sirve como base para fundamentar la aplicabilidad del análisis emergético en la evaluación de los sistemas de generación de electricidad. Sin embargo, hay que destacar que para su aplicación es necesario conocer o estimar las UEV de todas las formas de energía que entran al sistema. Como es casi imposible conocer todos estos valores actualizados para las corrientes analizadas en cada caso de estudio el método de sustitución ha sido ampliamente utilizado, seleccionando estos índices a partir de los valores más relevantes publicados en la literatura (Pan et al., 2018).

Aunque inevitable, este uso de UEV calculadas en otros tiempos y en otras partes del mundo, es molesto e introduce un nivel de incertidumbre respecto a la situación real de los sistemas. Ese constituye el punto de partida de la presente investigación, pues hasta la fecha en la bibliografía consultada no ha sido estimado en Cuba la transformidad de la electricidad producida en una termoeléctrica, principal forma de generación en el país, lo que ha obligado a los investigadores del tema asumir transformidades de otras locaciones del planeta. Luego, el objetivo de esta investigación es evaluar el potencial impacto ambiental de la producción de electricidad en Cuba tomando como caso de estudio la Central Termoeléctrica de Cienfuegos, Carlos Manuel de Céspedes. Esto permitirá una estimación de la transformidad de la electricidad en un caso autóctono propiciando una reducción de la incertidumbre en futuros trabajos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema objeto de estudio fue la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” (CTECMC) que para la producción de electricidad se divide en 4 procesos: la planta de tratamiento químico de agua, la fase de generación de vapor, el área de turbina y generador eléctrico y la planta de tratamiento de residuales. Como producto del sistema se obtiene únicamente electricidad que se entrega al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). El espacio temporal para la evaluación fue de un año dado por los valores promedio de los flujos en el período comprendido entre 2009-2018. El fundamento de esta consideración estriba en que todos los sistemas pulsan en intervalos de tiempo y al realizar los cálculos mediante los valores promedio según Odum et al., (2000) es una aproximación a evaluar el sistema en un estado estacionario. Para considerar el uso de materiales y energía en la fase de construcción se asumieron los datos reportados por Brown y Ulgiati (2002).

Para la representación del diagrama energético se identificaron las principales operaciones involucradas en el proceso tecnológico y en función de esto se modeló el sistema. Los símbolos usados para la confección del diagrama corresponden a los límites del sistema, fuentes, líneas de flujo, productor, caja, depósitos, interacciones, transacciones y la imprescindible degradación energética. Estos aparecen representados en la Figura 1.

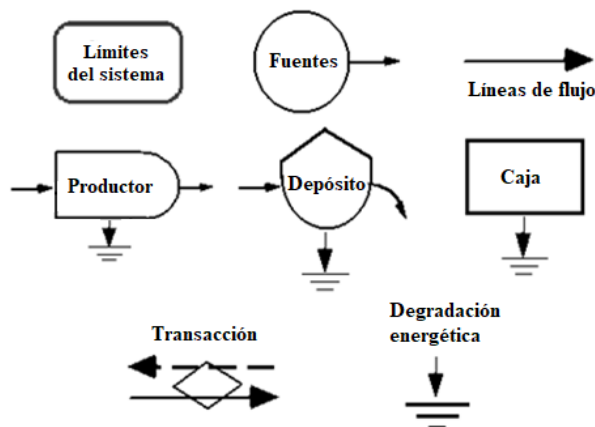


Figura 1. Símbolos usados para la construcción del diagrama energético

Conocido el flujo tecnológico se identificaron las corrientes de entrada y salida al sistema, así como los componentes internos del proceso, las transacciones de dinero correspondientes al uso económico y la degradación de la energía. Los principales insumos para el proceso fueron obtenidos a partir de datos históricos de la empresa y son: agua, agua de mar, aire para la combustión, diésel, productos químicos, aceites y lubricantes, servicios procedentes de la economía y la labor humana. En el caso del aire y la labor humana los flujos fueron estimados a partir de las ecuaciones 1 y 2.

$$\text{Aire} \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = \left[\text{Aire} \left(\frac{kg}{\text{año}} \right) \cdot C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot T(K) \right] \cdot \frac{1000 J}{1kJ} \quad (1)$$

$$\text{Labor} \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = \left(\text{cantidad de obreros} \cdot \frac{(h/\text{año})}{\left(8 \frac{h}{\text{día}} \right)} \right) \cdot 2500 \frac{kcal}{\text{día}} \cdot 4186 \frac{J}{kcal} \quad (2)$$

Como temperatura del aire se asumió 300 K y la capacidad calorífica para esa temperatura es 1,007 kJ/kg·K según Bergman y Lavine (2017). Para el cálculo de la labor humana se considera que cada obrero en promedio trabaja durante 8 horas al día consumiendo aproximadamente 2500 kcal/día. Los flujos fueron clasificados entonces en renovables (R), no renovables (N) y procedentes de la economía (F), este último dividido en materiales (M) y servicios (S).

Mediante un análisis documental fueron identificadas las principales unidades de valor energético de los flujos y luego se construyó una tabla para calcular los indicadores energéticos. Los indicadores usados aparecen representados en la Tabla 1 junto con su fórmula para calcularlos y una breve interpretación.

Tabla 1. Indicadores energéticos usados en la investigación

<i>Indicador</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Unidades</i>	<i>Interpretación</i>
Energía de fuentes renovables	R	seJ/año	Entrada de energía de fuentes renovables
Energía de fuentes	N	seJ/año	Entrada de energía de fuentes no

no renovables			renovables
Energía incorporada de la economía	F	seJ/año	Entrada de energía desde fuentes externas (usualmente con un intercambio monetario)
Energía usada por el sistema (Y)	R+N+F	seJ/año	Costo emergético del sistema
Transformidad (Tr)	Y/E	seJ/J	Relación entre la energía total que entra al sistema y la energía de los productos que salen. Expresa la cantidad de energía con calidad equivalente a la solar necesaria para generar 1 J del producto
Razón de renovabilidad (%R)	R/Y	-	Fracción de la energía renovable respecto a la energía total consumida
Razón de eficiencia energética (EYR)	Y/F	-	Medida de la ganancia de energía primaria del sistema debido a la explotación de los recursos locales
Razón de carga ambiental (ELR)	(N+F)/R	-	Medida de la perturbación medioambiental generada por el sistema
Índice de sostenibilidad energética (ESI)	EYR/ELR	-	Medida de la potencial contribución del sistema por unidad de carga impuesta al sistema local

Fuente: (Valdés y col., 2019)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se representa el diagrama energético para el sistema objeto de estudio.

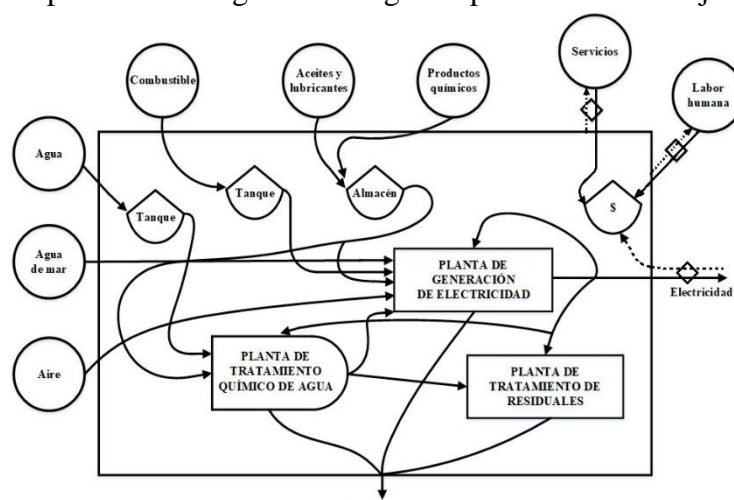


Figura 2. Diagrama energético de la producción de electricidad en la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes

La simbología de este sistema de modelación presenta analogías con lenguajes de programación lo que permite aprovechar las similitudes de los objetos de estudio, logrando una representación más estandarizada y comprensible de los mismos. De esta manera según Odum (1996) al conectar diferentes tipos de energía se pueden asociar varias partes y visualizar la complejidad de una manera sencilla.

La Tabla 2 corresponde a la tabla emergética para el proceso objeto de estudio. En ella aparecen los valores de los flujos consumidos por el sistema, así como las diferentes unidades de valor emergético asociados a estos.

Tabla 2. Tabla emergética para la Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes

#	Flujo	Magnitud	Unidad	Unidad de valor emergético (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
Fase de construcción					
1	Emergía usada la construcción de la planta			(a)*	3,27E+19
Fase de explotación					
Recursos renovables de la naturaleza (R)					1,2112E+20
2	Agua de mar	3,75E+14	g/año	1,90E+04 (a)	7,1200E+18
3	Aire	1,16E+17	J/año	9,82E+02 (b)	1,1400E+20
Recursos no renovables de la naturaleza (N)					3,4878E+17
4	3,4878E+17	3,29E+08	g/año	1,06E+09 (c)	3,4878E+17
Materiales de la economía (M)					3,9208E+21
5	Ácido sulfúrico	2,12E+08	g/año	1,35E+09 (d)	2,8600E+17
6	Hidróxido de sodio	2,31E+08	g/año	1,90E+09 (e)	4,3800E+17
7	Sulfato de Aluminio	8,75E+06	g/año	2,65E+09 (f)	2,3200E+16
8	Hidracina**	7,69E+05	g/año	3,80E+08 (a)	2,9200E+14
9	Fosfato trisódico	2,78E+05	g/año	9,35E+09 (c)	2,6000E+15
10	Sulfato ferroso	4,35E+06	g/año	1,07E+09 (g)	4,6600E+15
11	Diesel	1,37E+12	g/año	2,83E+09 (h)	3,9200E+21
12	Aceites y Lubricantes	6,25E+08	J/año	6,60E+04 (a)	4,1200E+13
Servicios de la economía (S)					6,5200E+19
13	Labor humana	7,84E+12	J/año	3,93E+06 (i)	3,0800E+19
14	Gastos en mantenimiento	7,48E+06	\$/año	4,60E+12 (j)	3,4400E+19
Emergía total					4,1401E+21
15	Electricidad	5,18E+15	J/año	7,9925 E+05	

(a) (Brown y Ulgiati, 2002), (b) (Odum, 2000), (c) (Arbault et al., 2013), (d) (Zhang et al., 2010), (e) (Paoli et al., 2008) (f) (Canuto, 2017), (g) (Odum et al., 2000), (h) (Bastianoni et al., 2009), (i) (Giannetti et al., 2016), (j) (Sweeney et al., 2007)

* La emergía usada en la fase de construcción del sistema fue considerada como importada de la economía fundamentado en que principalmente se refiere al uso de acero para maquinaria, concreto, combustibles y electricidad.

**La hidracina fue considerada como un producto químico.

Se puede observar que estos factores de equivalencia con referencia a la calidad de la energía solar van aumentando en la medida que el insumo es un producto con valor agregado, es decir que necesita más recursos y transformaciones para su producción, lo que está en concordancia con el principio de jerarquización energética. Respecto a los valores emergéticos de los flujos se puede observar ver que el diésel (Tabla 2) consiste en más del 90 % de la entrada al sistema por lo que de acuerdo al principio de Pareto las medidas orientadas a lograr un mejor aprovechamiento de este recurso son las que más influirán en el desempeño del sistema. La labor humana representa un valor muy pequeño en comparación con otros sistemas debido al elevado grado de automatización y al igual que en otros sistemas industriales el aporte energético del agua es bajo en comparación con otros flujos sin embargo este no debe ser despreciado no solo por su importancia para el funcionamiento del sistema sino por la relevancia de este recurso para la vida. Finalmente, el valor estimado para la transformidad de electricidad producida en el caso de estudio es de 7,9925 E+05 seJ/J.

En la Tabla 3 aparecen representados los valores de los indicadores emergéticos calculados. Como la razón de renovabilidad (% R) representa la fracción de los recursos renovables respecto a la emergía total consumida mientras mayor sea este indicador más sustentable es el sistema a largo plazo puesto que depende en menor medida de los recursos no renovables e importados de la economía. En el caso de la Termoeléctrica de Cienfuegos este indicador es solo del 2,9255 % lo que está dado puesto que la función del sistema es procesar el combustible para obtener una forma de energía de mayor calidad, no explotar un recurso natural. Este fenómeno condiciona además un bajo valor de la razón de eficiencia emergética para la Termoeléctrica de Cienfuegos.

Tabla 3. Indicadores emergéticos calculados

<i>Indicadores</i>	<i>Valor</i>
Razón de renovabilidad (%R)	2,9255%
Razón de eficiencia emergética (EYR)	1,0302
Razón de carga ambiental (ELR)	33,182
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	0,0310

La razón de eficiencia energética (EYR<2) muestra que no hay una contribución significativa de los recursos locales lo que es característico de procesos manufacturados. El alto valor de la razón de carga ambiental indica que el sistema genera un alto estrés ambiental lo que está en concordancia con estudios en sistemas similares como el presentado en Brown y Ulgiati (2004). Finalmente, el índice de sostenibilidad emergética está muy próximo de cero por lo que el sistema no es sostenible a largo plazo. Esto se interpreta como una alta dependencia del sistema de recursos no renovables y de la retroalimentación de la economía. Sin embargo, es preciso señalar que a en la formulación matemática de este indicador escapa el impacto de las emisiones al medio ambiente por lo que, aunque es eficiente en brindar información sobre los requerimientos energéticos para sostener un producto o servicio para hablar propiamente de sostenibilidad hay que considerar otros factores. Por ello Valdés y col., (2019) propone el uso del análisis emergético junto al análisis de ciclo de vida en el marco de un análisis multicriterio para obtener resultados más robustos.

En la Tabla 4 se muestra una comparación del sistema analizado con otros sistemas de generación.

Tabla 4. Comparación de la CTECMC con otros sistemas de generación

<i>Sistema de generación</i>	<i>Capacidad instalada</i>	<i>Energía entregada (J/año)</i>	<i>Transformidad (seJ/J)</i>	<i>EYR</i>	<i>ELR</i>	<i>ESI</i>
Eólico	2,5 MW	1,35E+13	1,10E+05	5,59	0,22	25,64
Geotermal	20 MW	3,28E+14	3,35E+05	56	0,96	5,87
Hidroeléctrica	85 MW	3,94E+14	1,12E+05	5,41	55	9,84
Cogeneración en central azucarero	6,5 MW	1,44E+14	1,24E+07	1,94	1,74	1,12
Biodigestor con sistema de generación	40 kW	2,00E+10	1,01E+06	2,07	0,93	2,22
Termoeléctrica (Italia)	1280 MW	2,35E+16	3,54E+05	1,33	23,3	0,057
CTECMC	158 MW	5,18E+15	7,9925E+05	1,0302	33,182	0,031

Fuente: Construido a partir de Brown y Ulgiati (2004), López y col., (2018) y Ciotola et al., (2011).

Se puede ver que no existe mucha diferencia en cuanto a los indicadores energéticos entre la termoeléctrica convencional de oil italiana y la del caso de estudio salvo la diferencia entre la energía entregada. Por este concepto y debido a la menor transformidad se puede establecer que la termoeléctrica italiana es más eficiente que la analizada en este estudio pese a que los indicadores están en el mismo orden. La mayor diferencia se encuentra respecto a las fuentes de energía renovables que todas presentan mejores indicadores excepto las transformidades de los sistemas de cogeneración en un central azucarero y el biodigestor. Por ello, dada la mayor eficiencia energética de estas formas de generación es sensato trazar estrategias para su aprovechamiento en el país reduciendo la presión sobre los recursos petrolíferos ejercida por la forma de generación tradicional.

Sin embargo, en el contexto cubano la explotación de la energía eólica, geotermal e hídrica se ve muy limitada debido a las condiciones geográficas del país. Por ello y basado en investigaciones previas como López y col., (2018) y Bravo (2019) los autores sostienen que el aprovechamiento de la biomasa en los procesos de cogeneración en centrales azucareros, así como la biodigestión son más atractivos en el contexto nacional. Los últimos no solo aprovechan recursos renovables en mayor cuantía, sino que además funcionan como sistemas de tratamiento. A pesar de esto, aun así, es difícil prescindir en la nación de los sistemas de generación convencionales debido al continuo crecimiento de la demanda de electricidad tanto por la sociedad como por otros procesos industriales. No obstante, se destaca que sí existe una voluntad del gobierno por diversificar la matriz energética y moverse hacia fuentes menos contaminantes y más eficientes.

4. CONCLUSIONES

1. La transformidad de la generación de electricidad en la Termoeléctrica de Cienfuegos “Carlos Manuel de Céspedes” es $7,9925 \text{ E}+05 \text{ seJ/J}$.
2. En el sistema existe una alta dependencia de los recursos no renovables y de la retroalimentación de la economía lo que condiciona un elevado impacto ambiental. Por ello, no es sostenible a largo plazo evidenciando la necesidad de explotar otras formas de generación de energía con menor impacto ambiental.
3. Sin embargo, debido al crecimiento de la demanda de electricidad en Cuba es necesario sensibilizar a la sociedad sobre el verdadero costo de la energía, que va más allá de lo que se puede expresar en valores monetarios.

AGRADECIMIENTOS

A todos los trabajadores y directivos de la Central Termoeléctrica de Cienfuegos que apoyaron en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Arbault, D., Rugani, B., Tiruta-Barna, L., & Bennetto, E., Emergy evaluation of water treatment processes., *Ecological Engineering*, Vol. 60, 2013, pp. 172-182.
- Bastianoni, S., Campbell, D.E., Ridolfi, R., & Pulselli, F.M., The solar transformity of petroleum fuels., *Ecological Modelling*, Vol. 220, No. 1, 2009, pp. 40-50.
- Bergman, T.L., & Lavine, A.S., *Fundamentals of heat and mass transfer.*, (8 ed.), John Wiley & Sons, United States of America, 2017, pp. 1-911.
- Bravo, E., Metodología para valorar la sostenibilidad de la gestión de residuos agrícolas con fines energéticos., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, Cienfuegos, Cuba, 2019.
- Brown, M.T., and Ulgiati, S., Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 10, No. 4, 2002, pp. 321-334.
- Brown, M.T., and Ulgiati, S., *Emergy Analysis and Environmental Accounting.*, *Encyclopedia of energy*, Vol. 2, No. 27, 2004, pp. 329-354.
- Canuto, R., *Produção mais limpa aplicada no processo de lavagem da indústria do vestuário: Avaliação multimétrica da viabilidade econômica e ambiental.*, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Universidade Paulista de São Paulo, Brasil, 2017.
- Ciotola, R.J., Lansing, S., and Martin, J.F., Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters., *Ecological Engineering*, Vol. 37, No. 11, 2011, pp. 1681-1691.
- Giannetti, B.F., Prevez, L., Agostinho, F., and Almeida, C., Greening a Cuban local mango supply chain: sustainability options and management strategies., *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol. 4, No. 3, 2016, pp. 251-266.
- López, E.J., García, Y., y Valdés, A., Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante el análisis emergético., *Centro Azúcar*, Vol. 45, No.2,

2018, pp. 59-67.

- Odum, H.T., Environmental accounting., Emergy and environmental decision making., John Wiley & Sons, United States of America, 1996, pp. 1-370.
- Odum, H.T., Emergy of Global Processes., En: Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios, Vol. 2., Gainesville (Florida), 2000, pp. 1-28.
- Odum, H. T., Brown, M. T., and Brandt-Williams, S., Introduction and Global Budget., En Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios, Vol. 1., Gainesville (Florida), 2000, pp. 1-17.
- Pan, H., Geng, Y., Jiang, P., Dong, H., and Lu Sun, R.W., An emergy based sustainability evaluation on a combined landfill and LFG power generation system., Energy, Vol. 143, 2018, pp. 310-322.
- Paoli, C., Vasallo, P., & Fabiano, M., Solar power: an approach to transformity evaluation., Ecological Engineering, Vol. 34, No. 3, 2008, pp. 191-206.
- Sweeney, S., Cohen, M. J., King, D., & Brown, M.T., Creation of an emergy database for standardized national emergy synthesis., In Proceedings from the Fourth Biennial Emergy Conference, Vol. 23., Gainesville (Florida), 2007, pp. 1-18.
- Valdés, A., López, E. J., y Alonso, A., Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica., Universidad y Sociedad, Vol. 11, No. 4, 2019, pp. 424-435.
- Zhang, H., Guan, X., Ding, Y., and Liu, C., Emergy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation., Journal of Cleaner Production, Vol. 183, 2018, pp. 1207-1215.
- Zhang, X. H., Deng, S., Jiang, W., Zhang, Y., Peng, H., Li, L., Yang, G., & Li, Y., Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges., Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 2, 2010, pp. 182-195.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Alejandro Valdés López. Modelación del sistema. Revisión y redacción del artículo final.
- Ing. Yoan Capote Trujillo. Análisis documental, identificación de las unidades de valor emergético de los flujos y recopilación de la información concerniente a los flujos del sistema.