

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

**“Análisis emergético del proceso de
cogeneración de electricidad a partir de la
combustión de bagazo en la UEB “Ciudad
Caracas”, Cienfuegos.”**

AUTORA: Danelis Díaz Marcos

**TUTORES: MSc. Reinier Jiménez Borges
MSc. Alejandro Valdés López
MSc. Dayana Rabassa Rabassa**

Cienfuegos 2020

DECLARATORIA DE AUTORIDAD

Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado: “Análisis energético del proceso de cogeneración de electricidad a partir de la combustión de bagazo en la UEB “Ciudad Caracas”, Cienfuegos.” y por este medio reconozco al Departamento de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cienfuegos con todos los derechos patrimoniales del mismo. Para que así conste firmamos la presente a los _____ días del mes de _____ del _____.

Autora: Dianelis Díaz Marcos

Tutor: MS.c Reinier Jiménez Borges

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

Firma Tutor

Firma Vicedecano

Pensamiento

La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia al mundo.

Isaac Asimov

Dedicatoria

*A mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo y cariño incondicional.
Gracias por estar siempre ahí, por ser mis guías, la experiencia que aún no
tengo y mi visión hacia el futuro; nada de esto hubiese sido posible sin ustedes.*

Agradecimientos

A mis tutores por ser mis guías y por enseñarme cada paso que debía recorrer en esta investigación.

A los trabajadores de la UEB “Ciudad Caracas” por dedicarme siempre tiempo, aunque su agenda de trabajo estuviese al límite.

A mis compañeros de aula por brindarme ayuda cuando lo necesité en estos 5 años, los quiero y nunca los olvidaré.

A todas aquellas personas que, por ser tantas, no puedo nombrar, pero han contribuido a mi formación espiritual y profesional.

A todos, sin que me falte nadie, gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo a partir de la caña de azúcar en la UEB “Ciudad Caracas”, a fin de contribuir a una agricultura sostenible. Se utilizó la Metodología Emergética, para evaluar las corrientes de entradas y salidas del proceso agro-industrial, determinando que el 53,26 % de la emergía del proceso proviene de la economía y que el 46,74 % de los recursos naturales. Se cuantificó las transformidades de los principales productos de la fábrica siendo: $1,6501\text{E}+08$ seJ/J para el azúcar crudo y $3,4664\text{E}+06$ seJ/J para la electricidad. Se determinó además la emergía específica de otros co-productos importantes como son: $2,3965\text{E}+09$ seJ/g para el bagazo, $1,6389\text{E}+11$ seJ/g para la miel final y $1,0415\text{E}+10$ 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 muestra que el proceso posee un bajo impacto ambiental en comparación con otros procesos, el índice de rendimiento emergético (EYR) de 1,88 revela 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 claves: industria azucarera, emergía, transformidad, indicadores emergéticos

ABSTRACT

This work evaluates the sustainability of the production process of raw sugar from sugar cane in the UEB “Ciudad Caracas”, in order to contribute to sustainable agriculture. The Emergetic Methodology was used to evaluate the inflows and outflows of the agro-industrial process, determining that 53.26% of the emergy from the process comes from the economy and that 46,74 % from natural resources. The transformations of the main products of the factory were quantified, being: $1,6501\text{E}+08$ seJ /J for raw sugar and $3,4664\text{E}+06$ seJ /J for electricity. The specific emergence of other important co-products was also determined, such as: $2,3965\text{E}+09$ seJ /g for the bagasse, $1,6389\text{E}+11$ seJ /g for the final honey and $1,0415\text{E}+10$ seJ /g for the it catches what is significant for further studies in the derivatives industry. The calculated emergent 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, which shows that the process has With a low environmental impact compared to other processes, the Emergic Performance Index (EYR) of 1,88 reveals 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: sugar industry, emerged, transform, emergético indicators.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAÍTULO I: SITUACIÓN ACTUAL DE LAS BIOMASAS Y HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN.....	4
1.1 Situación actual de aprovechamiento de las biomosas a nivel internacional.....	5
1.2 Situación actual de las biomosas en Cuba, proyecciones futuras.	7
1.3 Generación con biomasa. Clasificación.....	10
1.4 Herramientas e indicadores de economía ecológica	13
1.4.1 Indicadores ambientales	15
1.4.1.1 Huella ecológica	15
1.4.1.2 Huella de carbono.....	16
1.4.1.3 Emergía.....	17
1.4.1.4 Análisis de Ciclo de Vida	20
1.5. Estudios precedentes en la agroindustria azucarera	22
CAÍTULO II: METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EMERGÉTICA PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN CENTRAL AZUCARERO.....	26
2.1 Características del objeto de estudio.....	26
2.1.1 Localización geográfica	26
2.1.2 Fase Agrícola.....	27
2.1.3 Fase Industrial	28
2.2 Análisis emergético.....	29
2.2.1 Definición de los límites espacio-temporales.....	29
2.2.2 Modelación emergética	30
2.2.3 Balance emergético del sistema	30
2.2.4 Construcción de la tabla emergética.....	39
2.2.5 Cálculo y análisis de los indicadores emergéticos	40
2.3 Recomendación de alternativas	44
CAÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 Análisis emergético.....	44
3.1.1 Definición de los límites de Espacio-Temporales.....	44
3.1.2 Modelación del sistema agro-industrial	44
3.1.3 Resultados del balance energético.....	46

3.1.4 Resultados de la tabla emergética	50
3.1.5 Resultados del cálculo y análisis de los indicadores emergéticos.....	54
3.2 Recomendación de alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad	57
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS.....	

Introducción

INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible presenta una visión ambiciosa del desarrollo sostenible e integra sus dimensiones económicas, sociales y ambientales. Dentro de sus 17 Objetivos, se reconocen metas que requieren energías no contaminantes. La energía es central para casi 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 (ONU, 2015).

Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas (Mentado, 2017)

Las energías renovables han sustituido parcialmente a los combustibles fósiles y a la energía nuclear en cuatro mercados distintos: generación de electricidad, aplicaciones térmicas (calor para procesos industriales, calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico), carburantes para transporte y servicios energéticos sin conexión a red en el ámbito rural en los países en vías de desarrollo (Francisco & Cerdá, 2012).

El creciente interés por las energías renovables se debe a que estas fuentes energéticas contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como las emisiones de otros contaminantes locales, permiten disminuir la dependencia energética y contribuyen a la creación de empleo y al desarrollo tecnológico. Estos argumentos a favor de las energías renovables han sido refrendados por numerosos análisis de expertos y son compartidos actualmente por importantes instituciones internacionales (Francisco & Cerdá, 2012).

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 (Jímenez, López et al. 2018).

En los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021 (PCC, 2017) se plantea el empleo de las fuentes renovables de energía, instando a acelerar el cumplimiento del Programa aprobado hasta 2030 para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía.

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 nos pondría en un lugar cimero a nivel internacional y más aún si se considera que la misma está basada solo 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 (Curbelo, 2018).

El uso de la biomasa no contribuye al calentamiento global, produciendo una reducción de los niveles atmosféricos de concentración de CO₂, evitando por tanto el efecto invernadero y sus combustibles tienen poco contenido de azufre lo que evita las emisiones de dióxido de azufre, reduciendo las lluvias ácidas. La combustión produce menos cenizas que la del carbón, cenizas que son utilizadas, además, en el sector agrícola como complemento del suelo en las granjas (fertilizante) (Mentado, 2017).

Sin embargo, no todo son aspectos positivos porque la biomasa no está exenta de producir impacto sobre el medio ambiente. La producción y el proceso de la biomasa puede implicar un consumo de energía significativo, implicando un balance energético reducido para el uso de la misma, además causa graves daños de salud en el proceso de la quema de bagazo en los generadores de vapor para la obtención de calor y electricidad.

En Cuba la industria azucarera es la principal productora de biomasa y dados los problemas ambientales que esta genera es de gran importancia su atención. Para determinar esto existen varias metodologías entre las que se encuentran el Análisis de Ciclo de Vida, la Huella Ecológica, la Huella Hídrica y el Análisis Multivariado; en la actualidad la Metodología Emergética se ha convertido en una alternativa interesante a esta problemática, estimando los valores de emergías incorporados en los productos, procesos y los servicios ambientales, así como el impacto de las actividades antrópicas en los sistemas, razones que justifican su creciente empleo y que han validado su uso como una herramienta eficaz para la evaluación de los sistemas como un todo.

Para el desarrollo del presente estudio se plantea el siguiente **problema de investigación**:

No se han realizado estudios previos sobre el desempeño ambiental de la combustión de biomasa cañera en la UEB "Ciudad Caracas" de Cienfuegos, lo que limita establecer proyecciones futuras para un uso sostenible de este recurso.

Para dar respuesta al problema partimos de la siguiente **hipótesis**:

Si se realiza un análisis emergético se podrá evaluar el potencial impacto ambiental del aprovechamiento de la biomasa de bagazo de caña en la UEB "Ciudad Caracas".

El **objetivo general** para alcanzar los resultados propuestos se resume en:

Evaluar mediante el análisis emergético el proceso de combustión de bagazo de caña en la UEB "Ciudad Caracas" de Cienfuegos.

Los **objetivos específicos** son los siguientes:

1. Establecer los fundamentos teóricos-conceptuales esenciales sobre el aprovechamiento de la biomasa y métodos existentes para la valoración de su impacto ambiental.
2. Evaluar el desempeño ambiental del proceso de cogeneración de electricidad vía la combustión del bagazo de caña en la UEB "Ciudad Caracas".
3. Identificar posibles alternativas orientadas a mitigar los principales problemas detectados durante la evaluación.

Capítulo I

CAÍTULO I: SITUACIÓN ACTUAL DE LAS BIOMASAS Y HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN.

El presente capítulo desarrolla el marco teórico referencial de la investigación. El mismo comprende aspectos relacionados con la situación actual de aprovechamiento de las biomاسas a nivel internacional, en Cuba y sus proyecciones futuras, la definición de biomasa y sus características generales, así como los indicadores de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad.

La Figura 1 representa el hilo conductor que organiza de manera lógica los temas abordados.

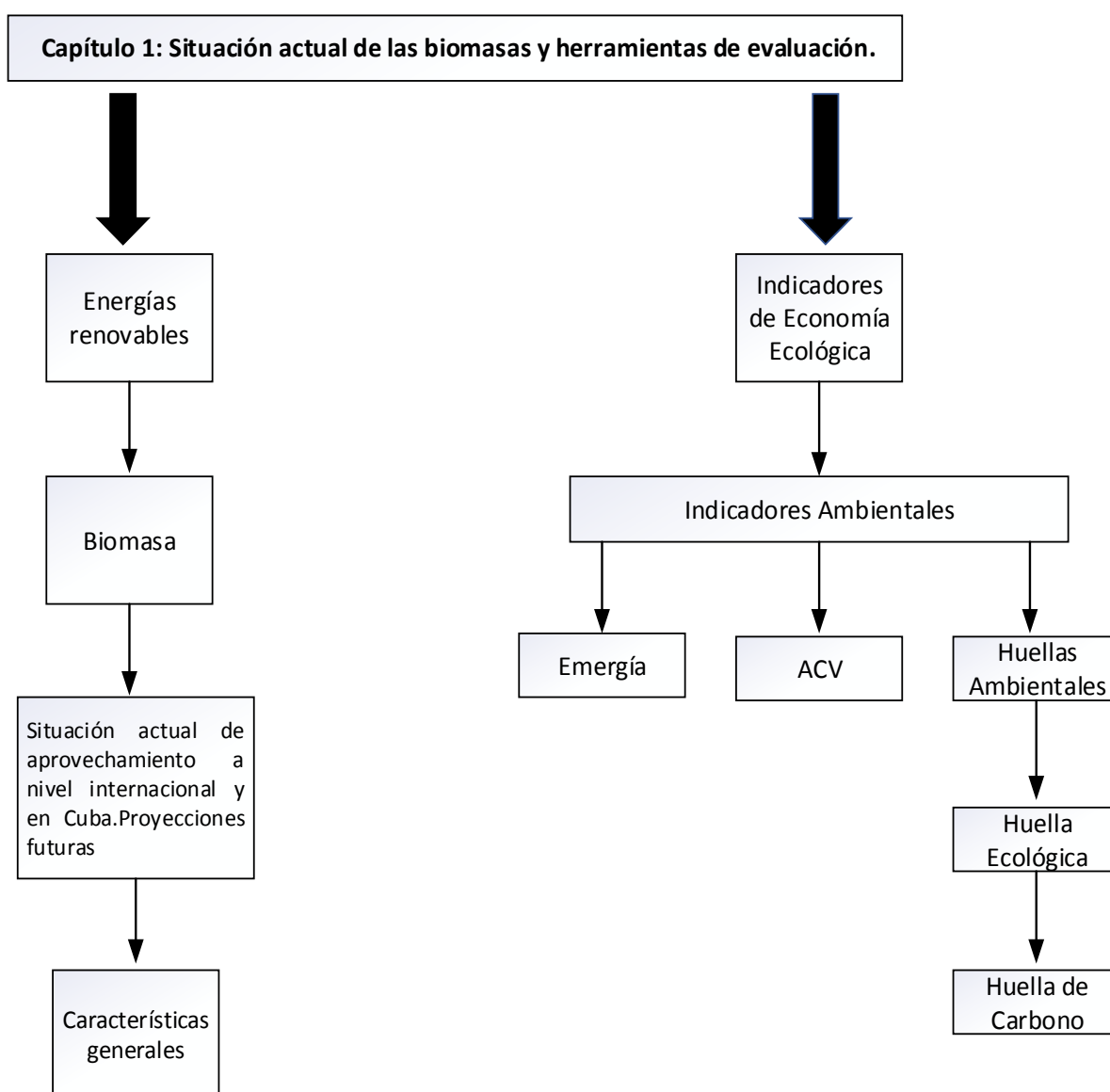


Figura 1. Hilo conductor para el desarrollo del capítulo 1. **Fuente** (Elaboración propia)

1.1 Situación actual de aprovechamiento de las biomasas a nivel internacional.

El crecimiento de las Energías Renovables (ER), en especial en el sector de la energía, se ha visto impulsado por el aumento en la relación costo-competitividad lo cual ha hecho que en muchos países los costos sean competitivos con las fuentes de energía convencional.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA en inglés) (2014), para el año 2040 se espera que la demanda de energía se incremente en un 60 %; asimismo se pronostica que debido a las emisiones de gases de invernadero se alcance al final del siglo un aumento en el calentamiento global entre 1.4 y 5.8 °C por lo cual todas las economías y los ecosistemas del mundo sufrirán graves consecuencias de no tomarse las medidas necesarias para mitigar esta problemática (Robles,2018)

En la Figura 2 se presenta la demanda energética primaria prevista para el año 2035 y la cuota de crecimiento que se espera en el período 2012-2035. La zona geográfica con mayor cuota de crecimiento la representan los países asiáticos no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD en inglés), entre los que se desatan países con altos estándares de consumo energético como China e India

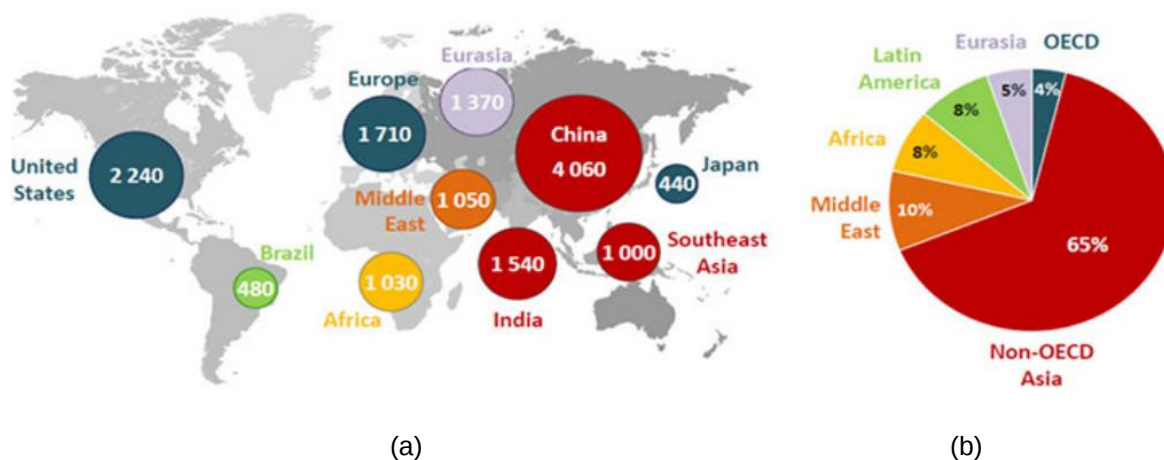


Figura 2 (a) Demanda primaria de energía, 2035 (Mtoe); (b) cuota de crecimiento mundial 2012-2035. Fuente: (Jonge, 2017)

Las energías renovables en estos momentos se han establecido como fuentes importantes de energía alrededor del mundo en correspondencia con el creciente agotamiento de las fuentes convencionales. Prueba de ello es que dichas fuentes participaron en cerca de un 30

% de la capacidad mundial de generación de electricidad, suficientes para suplir un 24.5 % de la demanda eléctrica mundial a finales del año 2016 (superior al 23.7 % del año anterior) tal como se puede apreciar en la Figura 3

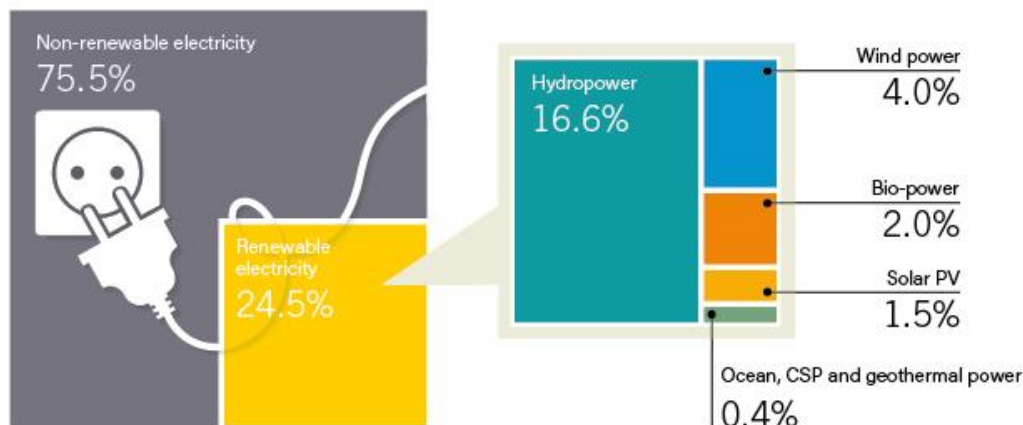


Figura 3 Cuota de energía renovable estimada en la producción mundial de electricidad, finales-2016. Fuente: (Douglas, 2018)

La biomasa representa hoy en día, tras el carbón, el petróleo y el gas natural, la cuarta fuente energética en importancia, siendo su aporte a la energía primaria mundial consumida de más del 15 %. Se entiende por Biomasa, en términos energéticos, (Vignote, 2016) un combustible procedente de productos y residuos naturales, tales como los provenientes de la agricultura (incluyendo tanto sustancias vegetales y animales), los provenientes de la actividad forestal e industrias ligadas al bosque, y la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos. El desarrollo en estos últimos años de tecnologías aplicadas a este campo ha permitido una utilización muy eficiente de la materia prima y ha ampliado sus ámbitos de aplicación a la generación de energías de mayor calidad que la simple producción térmica, tales como son los combustibles líquidos destinados al transporte y la electricidad. Todo ello ha contribuido a mejorar la competitividad de este recurso renovable frente a los productos fósiles y a aumentar su potencial energético.

La bioenergía, cubre alrededor del 9 % del consumo de energía primaria a nivel global. De esta cantidad, casi el 50 % corresponde a los llamados usos modernos de la biomasa. Estos usos incluyen la producción de electricidad, de calor en la industria, edificaciones y viviendas, así como la producción de biocombustible. Es significativo que esta contribución

es mayor que la que se realiza por la energía eólica, solar y fotovoltaica juntas a escala global (Curbelo, 2018)

La biomasa tradicional tiene una mayor contribución en la energía primaria en América Latina y el Caribe representando un 13 %, la leña procedente de bosques representa la biomasa de mayor utilización (Hugo, 2016).

La biomasa tiene un futuro prometedor: podría representar el 60 % del uso de energía renovable final total para el 2030, con un gran potencial en todos los sectores. La sostenibilidad, el medio ambiente y los aspectos sociales (la reducción de gases de efecto invernadero, la biodiversidad, el impacto sobre el suelo y el agua) podrían, si no se tratan adecuadamente, presentar importantes barreras para lograr la masificación en el uso de la biomasa. En este aspecto los gobiernos juegan un rol fundamental, puesto que pueden mejorar la sostenibilidad de la bioenergía con el establecimiento de criterios apropiados, indicadores, certificaciones y orientación técnica para supervisar su impacto (Robles, 2018)

1.2 Situación actual de las biomásas en Cuba, proyecciones futuras.

En la actualidad, en muchos países productores de azúcar a base de caña, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible. Recientemente, en Cuba, se ha aprobado un programa nacional para el incremento de la generación de electricidad a base de biomasa cañera. Este programa es parte de una estrategia nacional para el incremento de la participación de las fuentes renovables de energía en la matriz de generación de electricidad. El programa presenta un horizonte temporal hasta el 2030 y pretende que ese año se alcance un 14 % de generación de electricidad con biomasa cañera. El programa, permitirá a la industria azucarera cubana alcanzar una potencia para generación de electricidad de 1 070 MW (Rubio & Rubio, 2019).

El gobierno cubano en junio del 2014 aprobó la “Política para el Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía para el Periodo 2014-2030”. Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM 2018) la política tiene como objetivos:

- Transformar la estructura de las fuentes energéticas empleadas en la generación y el consumo de electricidad, incrementando la participación de las FRE.
- Disminuir la dependencia de los combustibles fósiles de importación.

- Elevar la eficiencia en la generación y en el consumo de la electricidad, logrando la reducción de los costos del kWh entregado por el Sistema Electroenergético Nacional (SEN).
- Elevar la sustentabilidad medioambiental y reducir la contaminación.

El programa para cumplir los objetivos propuestos contempla:

- Incrementar la participación de las FRE en la generación eléctrica hasta un 24 %.
- Producir 7 316 GWh/año con FRE.
- Sustituir 1,75 millones de toneladas de combustible/año.
- Dejar de emitir a la atmosfera 6 millones de toneladas de CO₂ anuales.

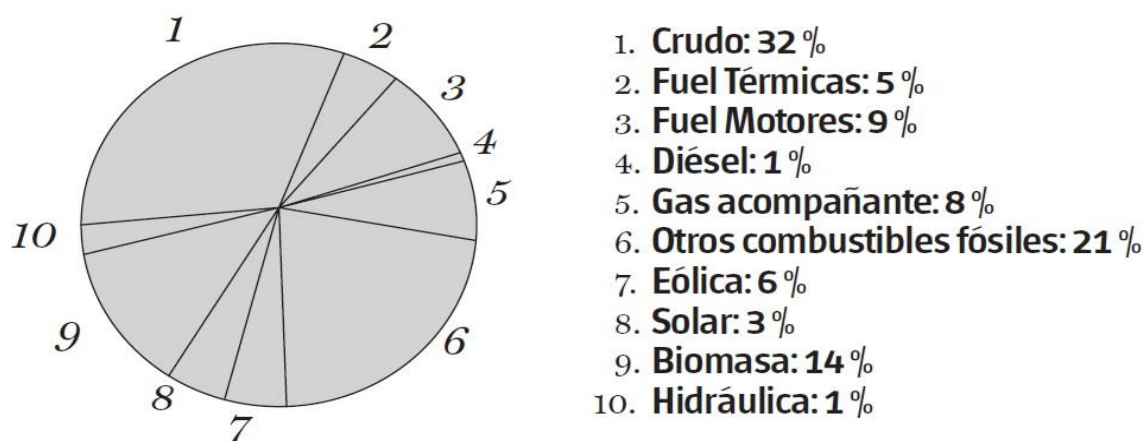
El incremento de la utilización de las fuentes renovables de energías constituye un lineamiento de la política energética de Cuba. De esta manera se desarrollan programas para la construcción de centrales hidroeléctricas, la instalación de celdas y paneles fotovoltaicos, sistemas termo solares, y la utilización de otras fuentes como la eólica y la biomasa.

La biomasa cañera es el portador energético renovable cuyo uso está más difundido en Cuba. En la Isla la potencia instalada hasta el 2010 para la cogeneración de energía eléctrica y térmica en la industria azucarera asciende a los 528 MW. El biogás es un recurso bioenergético renovable que se puede usar para producir electricidad, como gas de refrigeración, para la iluminación, la cocción de alimentos y el funcionamiento de los motores de combustión interna en los medios de transportes automotor, en el país se han identificado potencialidades para utilizar dicho componente en la cogeneración de energía eléctrica y térmica a partir de residuos de la industria azucarera y del café, entre otras (Bravo, 2015).

La potencia de biogás del país permitiría instalar una potencia de generación eléctrica de 85 MW y producir alrededor de 700 GWh al año. Así se evitaría emitir más de tres millones de toneladas de dióxido de carbono y se ahorrarían unas 190 mil toneladas de petróleo, además se obtendrían cerca de 2 millones de toneladas de abono orgánico y se reduciría significativamente la carga contaminante (Bravo, 2015).

Se puede afirmar que dentro de la meta que se propone el país, de lograr para el 2030 cubrir el 24 % de la demanda energética con fuentes renovables, la biomasa se consolida como alternativa altamente prometedora como se puede observar en la Figura 4.

ENERGÍAS RENOVABLES: 24 %



Proyección para el 2030 de la distribución de la generación de energía en el país.

FUENTE: MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

Figura 4 Proyección para 2030 de la distribución de la generación de energía en Cuba. Fuente: (MINEM)

En la Tabla 1 se representan las biomásas empleadas como combustible en Cuba (no incluye el sector privado) del año 2013 al 2018 (ONEI, 2018).

Tabla 1. Biomásas empleadas como combustible en Cuba. Fuente: (ONEI, 2018).

Concepto	UM	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Biomasa							
Bagazo de caña ^(d)	Mt	4138,1	5152,2	5386,5	3922,0	5051,4	6026,4
Leña	Mm ³	1383,8	1196,6	1079,2	1106,8	1053,4	962,2
Serrín de madera	Mt	3,7	4,4	2,2	0,4	1,3	0,1
Cáscara de arroz	Mt	16,5	4,3	4,3	13,6	2,7	-
Desechos de café	Mt	0,5	3,6	2,5	1,2	1,4	-

Otros desechos forestales	Mt	7,5	12,9	6,4	1,2	5,4	0,8
Otros desechos agrícolas ^(e)	Mt	1,1	2,6	2,6	1,4	1,7	-

Nota: 2018, 2019. d- incluye paja de caña; e- incluye cáscara de coco y otros desechos agrícolas.

Como se puede observar de las biomásas presentadas en la Tabla 1 el bagazo de caña constituye la biomasa más rentable, durante los 6 años el total de bagazo utilizado como combustible representa 29 676,6 Mt con respecto a las demás biomásas que poseen un comportamiento descendiente o irregular, presenta un ascenso significativo del total empleado en el año 2013 con respecto al 2018, correspondiente a un 45,63 % de incremento lo que equivale a 1 888,3 Mt más.

El uso de las fuentes renovables de energía para la generación de electricidad está estrechamente relacionado con la conservación del medio ambiente, y los resultados alcanzados en la provincia de Cienfuegos así lo demuestran.

La provincia de Cienfuegos está localizada en la zona central de Cuba y ocupa un área de 4178 km² 417 800 ha). Tiene una economía variada que está basada fundamentalmente en la agricultura, la industria y el turismo. En el territorio sureño se utilizan tres vías para entregar al Sistema Electroenergético Nacional, electricidad limpia a partir de fuentes renovables; la hidroenergía, la biomasa en los centrales azucareros y los parques solares; las que se deben incrementar en los próximos años.

1.3 Generación con biomasa. Clasificación

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la “**biomasa**” como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”

La energía que se puede obtener de la biomasa proviene de la luz solar, la cual, gracias al proceso de fotosíntesis, es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO_2 del aire y lo transforman en sustancias orgánicas. En estos procesos de conversión la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos (polisacáridos, grasas) y que

es incorporada y transformada por el reino animal, incluyendo al ser humano, el cual invierte la transformación para obtener bienes de consumo. (Figura 5)



Figura 5 Generación de Biomasa. Fuente: (Rico, 2007)

De acuerdo a su origen la biomasa se clasifica en:

Natural: Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana.

Residual: Consiste en la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos, y entre ellos pueden citarse:

- Residuo de actividad agrícola, forestales y de jardinería: pajas de cereales, zuros de maíz, excedentes agrícolas, los originados en los tratamientos silvícolas, etc.
- Residuos de industrias agrícolas y forestales: como las provenientes de aceites de oliva, industria vinícola y alcoholera, producción de frutos secos, recortes de madera, serrín, etc.
- Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU)
- Residuos ganaderos: principalmente purines.
- Residuos agroindustriales: industrias lácteas, papelera, destilería, almazaras, conserveras, etc.
- Aceites alimentarios usados.

Cultivos energéticos: Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas alimentarios, los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa, y no de calidad (De Lucas & Del Peso, 2012).

La aplicabilidad de la biomasa puede resumirse de tres formas fundamentales, como biocombustibles provenientes de la transformación química, física o biológica de las fuentes de biomasa y que a su vez pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Tales como el etanol y el biodiesel que sustituyen cantidades significativas de combustibles fósiles para su utilización en el transporte; se utiliza para la producción eléctrica, calor y vapor responde a lo que se conoce como “energía verde”, en los procesos de combustión y sus efectos se utilizan principalmente en los sistemas de calefacción de hogares y para la cocción, pero también responde a la acción combinada de calor y energía para su aprovechamiento en centrales para la generación eléctrica, accionando turbinas de vapor; se emplea para la obtención de biogás, la materia prima para la generación de biogás son los residuos orgánicos, agrícolas y las excretas de animales; a través de procesos de purificación puede ser transformado en gas natural para el consumo residencial (Mentado, 2018).

Al analizar las características de este tipo de fuente de energía, como ventajas se encuentran las siguientes:

- Convertir un residuo en un recurso: se utilizan residuos de otras actividades (principalmente forestal y agrícola) que no tenían un valor económico.
- Reducir la disposición de residuos: el uso de la biomasa como fuente energética, constituye un medio para la utilización de grandes cantidades de residuos y con ello una solución a su disposición final.
- Balance neutro en emisiones de CO₂ (principal responsable del efecto invernadero). La combustión de biomasa produce CO₂, pero una cantidad análoga a la emitida fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento, por lo que la combustión de la biomasa no supone un incremento neto de este gas en la atmósfera.

- Estabilidad de la oferta: a diferencia de la energía eólica y solar, la energía eléctrica a partir de biomasa es independiente de las condiciones climatológicas (Griffa, Marcó et al. 2017).

Sin embargo, la biomasa no está exenta de producir impacto sobre el medio ambiente y los ecosistemas, como consecuencia de su uso, los árboles son cortados indiscriminadamente, llevando a la pérdida de biodiversidad, el aumento de las emisiones de carbono y provocando a su vez daño a la calidad del suelo. Requiere previa preparación, que facilite las operaciones de transporte, almacenamiento y manipulación, para su conversión energética en la industria, además de poseer menores rendimientos energéticos que los combustibles derivados de los carburantes fósiles.

1.4 Herramientas e indicadores de economía ecológica

La *economía ecológica* es una ciencia que estudia la viabilidad en términos de sostenibilidad del modelo económico, a través de los flujos de materiales, energía y residuos que se necesitan. A diferencia de la *economía convencional o neoclásica* que tiene como objetivo la persecución del crecimiento económico a través del uso óptimo de insumos y factores de producción. La economía ecológica no es una rama de la teoría económica sino un campo de estudio transdisciplinar, de forma que se fusionen distintas áreas de conocimiento de forma que se puedan afrontar los problemas complejos (Morán 2017).

Se puede decir que su objetivo es analizar y explicar el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente, desde un sistema económico que incorpora en sus extremos los procesos de extracción de recursos naturales y excreción de desechos; esto, dentro de un sistema mayor y abierto, representado por el ecosistema y en interrelación con los ciclos biogeoquímicos. De esta manera, el medio ambiente ocupa un lugar protagónico en esta disciplina, en la medida que se le considera como un sistema finito, en estrecha interrelación con la economía (Cuadra, Véliz et al. 2017).

Por tanto, la economía ecológica estudia las relaciones entre el sistema natural (biosfera) y los subsistemas social y económico que se desarrollan en su seno, haciendo especial hincapié entre la inviabilidad del crecimiento económico continuo que choca con los límites físicos y biológicos de los ecosistemas. Una economía que se desarrolle dentro de los

límites de la naturaleza y en términos de justicia social son centrales en la economía ecológica, aspectos que no son centrales en la economía convencional (Morán 2017).

La *Economía Convencional* es la hegemónica en el contexto mundial, también denominada neoclásica, capitalista, neoliberal. La contabilidad macroeconómica (representada por el Producto Interno Bruto, PIB no toma en cuenta los componentes socio-ambientales, y es incapaz de valorar el hecho de que la economía esté incluida en la biosfera y de la finitud de recursos y sumideros. Es un hecho que a medida que una economía crece la sostenibilidad ecológica disminuye y hace que estemos inmersos en una crisis eco-social sin precedentes en la historia de la humanidad. Se asienta sobre el mito de que el progreso económico sin límites y el espejismo de que la propia autorregulación del modelo supondría la redistribución de la riqueza a todos los países y personas (Morán, 2017).

Al tratar la economía ecológica y la economía convencional no podemos dejar de señalar la *Economía Ambiental*, esta analiza las problemáticas ambientales con herramientas económicas de forma que reconoce los “errores”, pero no cuestiona los fundamentos de la economía convencional, sino que busca corregir las externalidades ambientales negativas al asignarles un valor económico y proponiendo soluciones mayoritariamente tecnológicas que no van a la causa del problema (depuradoras, coches eléctricos, tratamiento de residuos). Por tanto, busca optimizar la explotación de los recursos naturales para alcanzar un estado de “contaminación óptima” (protocolos y normativas ambientales) (Morán, 2017).

Disímiles esfuerzos se han hecho por buscar herramientas que puedan evaluar de forma objetiva e integral los posibles impactos de las actividades desarrolladas por el hombre y su interrelación con el medio donde las realiza. La evolución de las mismas, ha estado condicionada a la propia evolución de la concepción que el hombre ha adquirido de su modelo de desarrollo.

Las herramientas de la economía ambiental son las más aplicadas en la actualidad para la toma de decisiones de negocios que impliquen factores ambientales. Este tipo de negociación puede llegar a funcionar cuando se trata de externalidades mutuas entre empresas, o entre empresas y consumidores, siempre y cuando lleguen a un acuerdo sobre el valor monetario de las externalidades implicadas en el problema. Sin embargo, en los

casos de externalidades que afectan bienes invaluable como la biodiversidad, el futuro de los recursos o el bienestar de las generaciones presentes o futuras, suele resultar de difícil aplicación (López, 2013).

1.4.1 Indicadores ambientales

Los indicadores biofísicos de sostenibilidad ambiental, tales como las huellas (ecológica, de carbono e hídrica) permiten valorizar el impacto ambiental de las distintas actividades antrópicas en términos de unidades físicas. Un indicador ambiental que arroje resultados altos para una región o nación determinada, incidirá, a corto o largo plazo, negativamente en su PIB y en su Índice de Desarrollo Humano (IDH), al denotar una actividad económica generadora de externalidades negativas de consideración (López, 2013).

A continuación, se hará referencia a algunos de estos.

1.4.1.1 Huella ecológica

Indicador de sustentabilidad diseñado por William Rees y Malthis Wackernagel a mediados de la década de los noventa del siglo pasado, para conocer el grado de impacto que ejerce cierta comunidad humana, persona, organización, país, región o ciudad sobre el ambiente (Lara 2012).

La nota distintiva de la huella ecológica con respecto a otros indicadores de comportamiento ambiental es la condensación de la información en un único parámetro: la medida biofísica directa del capital natural renovable. Además, la huella ecológica es un buen punto de partida para analizar las relaciones globales y de iniquidad entre países ricos y pobres.

La huella ecológica evalúa un determinado modelo de vida. Se expresa en hectáreas por persona y año (aunque actualmente se tiende a expresar en hectáreas globales/persona/año), representando la superficie necesaria para asimilar el impacto de las actividades del modelo de vida analizado. La huella de una población está determinada por su número de miembros, el volumen de consumo y la intensidad en el uso de los recursos para proveerla de bienes y servicios (Leiva, Rodríguez et al. 2012).

La huella ecológica es un indicador útil para saber la salud del planeta; obtener información sobre las desigualdades entre países; conocer el impacto de nuestro consumos y desechos

para modificarlos en favor del ambiente; realizar estudios de sustentabilidad de poblaciones y territorios; planear las actividades de una empresa, sector económico, comunidad, región, ciudad y país; diseñar, aplicar y evaluar políticas públicas en materia de desarrollo sustentable y, al combinarse con el IDH, establecer condiciones mínimas para avanzar en ese camino (Lara 2012).

La huella ecológica y el desarrollo sustentable están íntimamente vinculados, en tanto que el primero es un indicador y una herramienta importante para la planeación del segundo. Además, ambos apuntan al mismo objetivo: mejorar la calidad de vida de todos sin aumentar el uso de los recursos naturales más allá de la capacidad del ambiente de proporcionárnoslos indefinidamente sin comprometer nuestro futuro ni el de las siguientes generaciones (Lara 2012).

1.4.1.2 Huella de carbono

La Huella de Carbono (HC) surge del concepto de Huella Ecológica de la cual podría decirse que es un subconjunto, con la diferencia de que ésta mide la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento global (siendo este último uno de los cambios que sufre actualmente el clima) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto a lo largo de su vida útil, para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO₂. También se puede considerar que la HC es una versión simplificada de un ACV en el que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente la categoría de impacto relativa al Calentamiento Global (Mondéjar, Viñoles et al. 2011).

El método consiste en traducir todos los impactos ambientales, tanto consumos como desechos, en la cantidad de dióxido de carbono equivalente emitido.

Existen cuatro métodos principales para el cálculo de la HC en empresas, organizaciones, servicios, procesos y productos. Estos métodos son conocidos como: Protocolo de Gases Efecto Invernadero implementado en el 2001 por el Consejo Mundial de Negocios por el Desarrollo Sustentable (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) y por el Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute, WRI) que tiene como meta el establecimiento de bases para la contabilización de emisiones de los GEI. Balance de Carbono, desarrollada por la Agencia del Medio Ambiente y Energía de Francia en el

año 2002. El método considera la contabilización de emisiones directas e indirectas de los GEI, relacionadas con las actividades industriales, empresariales, y de otras asociaciones y entidades administrativas. Especificaciones Públicamente Disponibles, PAS 2050 enfocado al cálculo de las emisiones de productos y servicios y responde a las normativas ISO 14040 referido al Análisis del Ciclo de Vida y 14067 Huella de carbono para productos. Método Compuesto de las Cuentas Contables, en este método la información fluye directamente de una organización a otra sin necesidad de contar con la colaboración de clientes o proveedores de la cadena de suministro para calcular la huella. Toda la huella de productos pasa de una entidad a otra, acumulándose progresivamente, y el estudio de huella se limita siempre a una única entidad (Espíndola & Valderrama, 2011)

El cálculo de la huella de carbono personal se realiza en base al análisis de los datos suministrados por las personas individuales respecto de su estilo de vida. El cuestionario utilizado para su evaluación, está estructurado en distintas secciones, que abarcan los puntos significativos de emisión personal, como consumo residencial de energía, transporte, alimentación, consumo de bienes y servicios y generación de residuos. Cada uno de estos consumos tiene su propia huella de carbono que es heredada por el usuario. Los consumos familiares se prorratan según el número de habitantes en el hogar (López, 2013).

1.4.1.3 Emergía

Emergía es la suma de toda la energía de una forma, necesaria para desarrollar un flujo de energía de otra forma, en un período de tiempo dado. Esta herramienta es utilizada para comparar la obra de la naturaleza con la de los humanos sobre una base justa y equitativa (Izursa, 2011).

La emergía se puede comprender como un indicador de la economía ecológica para la medición de la sustentabilidad. El método emergético es una metodología con base ecológica y termodinámica, que permite incluir los flujos de materia y energía procedentes de la base biogeofísica de los socio-eco-sistema (SES) dentro de la valoración de los costes ecológicos de la economía, complementando la escala de acción de otras metodologías tradicionalmente usadas con este objetivo, en un contexto multi-criterio de evaluación del uso del capital natural. Para que la síntesis emergética llegue a tener un papel dentro en la

resolución de los problemas ligados a las relaciones ser humano-naturaleza, debe explotar estas propiedades dentro de este contexto multi-criterio (Bravo 2018).

El análisis emergético surge de la observación de Howard Thomas Odum que, en los procesos de auto-organización de sistemas complejos, la segunda ley de la termodinámica implica que la energía que pasa de un nivel a otro del sistema es menor en cada escalón; pero, la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de auto-organización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo. Es decir, la energía se concentra conforme se avanza en niveles de auto-organización y complejidad lo que implica que 1 joule de energía solar, 1 joule de carbón o 1 joule de electricidad, aunque representan la misma cantidad, no representan la misma calidad de energía, en el sentido del potencial que tienen para actuar sobre el sistema y en la necesidad que el sistema tiene de aportar mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas. Esto conduce a la conclusión que existe una jerarquía de energías según su calidad (Lomas, Di Donato, & Ulgiati, 2007).

El análisis emergético es una metodología ecológico-termodinámica de valoración ambiental basada en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero (Odum, 1996) utilizados en un sistema socio-ecológico. El objetivo de esta metodología es estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con su ambiente, a través del uso de una perspectiva sistémica y energética.

Entonces la energía puede ser considerada como la “memoria energética” de toda la energía solar necesitada para sostener un sistema, tomando en consideración el trabajo que ha sido realizado previamente por el medio ambiente para producir un bien o servicio (Saldini, et al.,2016).

Para transformar las diferentes formas de energía a la calidad de la energía solar se utiliza un factor de equivalencia llamado unidad de valor emergético (UEV por sus siglas en inglés). Este constituye una expresión intensiva de la energía que expresa la cantidad de energía con calidad equivalente a la solar necesaria para generar 1J (transformidad) o 1 g (energía específica) de un producto o servicio. Las unidades de la transformidad y la energía específica son seJ/J y seJ/g respectivamente e igualmente se define el valor

energético monetario expresado en seJ/\$ para analizar la influencia de los flujos monetarios que entran y/o retroalimentan a los sistemas. Luego como las redes energéticas están interconectadas de manera tal que las salidas de unas son las entradas de otras estas unidades constituyen una medida de la localización del producto o servicio en la jerarquía energética o de la eficiencia de la conversión para generarlo. Como la segunda ley de la termodinámica establece que con cada transformación se degrada energía a menor unidad de valor energético mayor eficiencia (Valdés, López & Alonso, 2019).

El punto de partida del análisis energético como un nuevo campo de estudio es que precisamente se pueden analizar los diferentes tipos de energía utilizando estos factores de conversión. Para la realización de una evaluación energética se sigue un procedimiento de cuatro etapas: (1) definición espacio-temporal del sistema de estudio, (2) modelación del sistema usando la simbología energética, (3) balance energético del sistema y (4) cálculo y análisis de indicadores energéticos (Valdés, López & Alonso, 2019).

Sin embargo, al igual que otras metodologías la emergía ha sido cuestionada. Consecuentemente, todas las teorías termodinámicas del valor han sido rechazadas por los economistas a través de las décadas. Lo que más se critica sobre la evaluación energética parece ser que adopta un valor ecocéntrico de los productos y procesos ecológicos e industriales. Esto está en contraste directo con la perspectiva economista, que es antropocéntrica (Hau & Bakshi, 2004).

Ante las críticas de los economistas los “emergistas” alegan que el análisis energético difiere del análisis económico porque en vez de usar el valor monetario de los bienes y servicios utiliza una medida de la calidad de los recursos.

A pesar de las críticas el uso de la metodología energética ha permitido: (a) investigar sistemas fuera de las actividades humanas, (b) conocer el papel que los sistemas ecológicos tienen para el ser humano, (c) implementar una evaluación ligada a la aportación ambiental en lugar de la clásica evaluación desde el punto de vista del usuario, (d) evaluar procesos donde el soporte directo de materiales es pequeño pero el indirecto es grande, (e) tener en cuenta la escala temporal o memoria de los servicios usados, (f) evaluar la renovabilidad de los servicios, (g) evaluar la calidad de los servicios de un modo cuantitativo, (h) evaluar el

impacto de procesos consistentes en unir flujos de baja y alta calidad, (i) incluir en la evaluación el trabajo humano y los servicios bajo un marco común (Lomas,2009).

1.4.1.4 Análisis de Ciclo de Vida

El ACV es una metodología utilizada a nivel mundial y se encuentra estandarizada mediante las guías de la serie ISO 14000, como sistema de evaluación para determinar los impactos ambientales de los sistemas productivos. Teniendo en cuenta lo anterior se debe resaltar que en la actualidad el ACV se viene desarrollando sin tener en cuenta algunos aspectos fundamentales de la sostenibilidad, como son los factores sociales, culturales y económicos, que en este momento no están incorporados en una adecuada aplicación, por este motivo surge la propuesta de incluir una visión integral de los impactos ambientales a la metodología del ACV, para tomar decisiones en un sistema productivo encaminado a la sostenibilidad ambiental (Toro & León, 2012).

Definición de Análisis del Ciclo de Vida:

Las definiciones más utilizadas para el ACV, son las siguientes:

Norma ISO 14040: “el Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”

Norma española UNE 150-040-96: “El Análisis de Ciclo de Vida es una recopilación y evaluación de las entradas y salidas de materia y energía, y de los impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a la función del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida”

Consejo Nórdico de Ministros: “El Análisis de Ciclo de Vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos”.

En los últimos años se ha desarrollado un enfoque sistémico para el análisis de los impactos ambientales asociados a procesos y productos. Los procesos industriales no sólo generan

residuos, sino que también consumen recursos naturales, requieren infraestructura de transporte, utilizan insumos químicos, agua y energía, y generan productos que deben ser transportados, consumidos y, en algunos casos, reutilizados antes de su eliminación final.

De manea general el análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta utilizada para realizar evaluaciones del impacto ambiental de productos y/o servicios desde la extracción de materiales hasta su gestión como residuo. Por su enfoque metodológico permite: a) una comprensión holística del flujo de materiales y/o energía a través de las interconexiones de los sistemas analizados, b) la identificación de los procesos con mayor consumo de recursos para de acuerdo con el principio de Pareto enfocar los mayores esfuerzos en mejorar las etapas más significativas, c) establecer una línea de base de desempeño ambiental para el análisis de mejoras, d) la evaluación y comparación de tecnologías con un mismo objetivo, e) el diseño de productos más amigables con el medioambiente, entre otras aplicaciones (Valdés, 2019).

El ACV permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de cada interacción ambiental. A pesar de postular una cobertura sobre todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos resulta difícil abarcar todas las actividades desde la “cuna a la tumba”, por lo que se debe definir claramente el sistema requerido para que el producto cumpla con una determinada función.

Para la ejecución de un análisis de ciclo de vida se sigue un proceso de cuatro etapas (NC-ISO 14040, 2009)

- a)** Definición del objetivo y el alcance
- b)** Análisis del inventario de ciclo de vida
- c)** Evaluación del impacto del ciclo de vida
- d)** Interpretación del ciclo de vida

En la Figura 6 se ilustran las conexiones entre estos cuatro pasos y se puede observar que consiste en un proceso iterativo, el que permite aumentar el nivel de detalle con cada iteración.

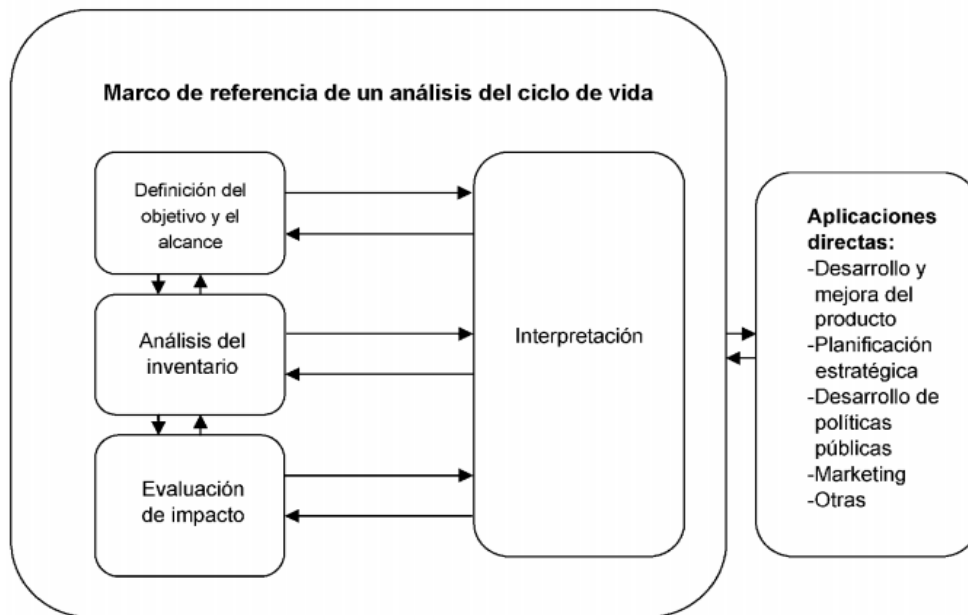


Figura 6. Fases del Análisis del Ciclo de Vida. **Fuente:** (NC-ISO 14040, 2009).

- a) **Definición de objetivos y alcance:** Se debe precisar los objetivos que motivan el estudio, así como los límites del sistema a analizar e identificar los componentes del ciclo de vida (ej. extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final de residuos, etc).
- b) **Análisis de inventario:** se desarrolla aquí los balances de materia y energía a través de los diferentes componentes del ciclo de vida.
- c) **Evaluación de los impactos ambientales potenciales:** debe considerar la salud y seguridad de las personas, y las cargas ambientales. Se debe identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.
- d) **Interpretación:** en base al análisis anterior, se debe identificar y evaluar medidas de mejoramiento que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

1.5. Estudios precedentes en la agroindustria azucarera

La industria azucarera genera un gran impacto en el medio ambiente. En la actualidad, uno de los métodos novedosos para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales

generados por productos y procesos, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), entre otras metodologías (Pérez, Contreras et al. 2010).

La biomasa en la caña de azúcar se distribuye entre el tallo verde (75 %) y los residuos agrícolas cañeros. Estos últimos incluyen el cogollo o parte superior de la planta (30 %), hojas secas (30 %) y hojas verdes (40 %). La biomasa aprovechable energéticamente es el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). El bagazo representa 30 % de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de este proceso (Rosa, Contreras et al. 2010).

El aumento de la eficiencia en la producción de electricidad en esta industria permitiría cubrir una parte importante de la que actualmente se genera en las centrales termoeléctricas (Rosa, Contreras et al. 2010).

Teniendo en cuenta la relevancia del tema se han realizado diversas investigaciones para evaluar el impacto ambiental que posee la biomasa en la industria azucarera, así como las fuentes de mayor impacto en la fase agrícola e industrial. Algunos de estos estudios son los siguientes:

Pérez, Contreras & Pérez (2010), implementan un ACV en una empresa donde a partir de una muestra representativa diaria de los parámetros fundamentales de la Industria y la Agricultura, se promediaron las entradas y salidas del proceso durante las zafas comprendidas en el periodo (2006-2008).

Para el estudio del ACV se utilizó el programa Simapro 7.1, utilizándose la base de datos Ecoinvent (2003) y los procesos creados para las condiciones de Cuba. Se empleó el método del Eco-indicador 99 (PRé Consultans 2004) que tiene en cuenta 11 categorías de impacto y tres categorías de daños. Para de esta forma demostrar cuáles son los productos y operaciones de mayor influencia en el impacto total del proceso.

Una vez propuestas las medidas de mitigación, se realiza la comparación de los impactos ambientales asociados al proceso antes y después de las mejoras de forma tal que se pueda cuantificar su reducción. Se realizó además un Análisis Estadístico de los Parámetros Primarios de la industria y de la etapa agrícola.

Los resultados obtenidos mostraron que la metodología utilizada constituye una herramienta valiosa para evaluar el desempeño ambiental de la producción de azúcar y se

comprueba científicamente que la mayor contribución al impacto del proceso está dada por la etapa agrícola y en ésta, por el uso de la tierra, la producción y uso de fertilizantes químicos y combustibles. El mayor impacto en la etapa industrial está dado por la cogeneración de electricidad con bagazo, producto de la emisión de material particulado.

A pesar de la importancia de estos resultados obtenidos, no se aplica ninguna otra metodología, no estando exenta la utilizada de limitaciones a pesar de la validez del método.

Rosa, Contreras, et al (2010), efectúan un estudio del uso del ACV en la producción de azúcar crudo en una fábrica genérica, haciendo énfasis en la comparación de los impactos ambientales generados, usando sistemas para la depuración de los gases de combustión y cuando estos no se utilizan.

Para la evaluación de los impactos, se utilizó el software Simapro Versión 6.0 (Goedkoop y Oele, 2004), utilizándose la base de datos Ecoinvent (2003), y los procesos creados para las condiciones de Cuba. Se utiliza el módulo de comparación de procesos para confrontar los resultados de la evaluación ambiental con el uso o no de sistemas de depuración en el proceso de cogeneración de electricidad.

Para evaluar la influencia del uso o no de sistemas de depuración, solo se modifica, en el inventario, la emisión del material particulado, manteniendo constantes los demás parámetros

Demostrándose como resultado de la investigación que a partir del uso de sistemas de depuración con 75 % de eficiencia en la remoción de material particulado disminuye el impacto ambiental generado en 88 %, debido a que, el uso de bagazo para la cogeneración de energía, representa la mayor contribución al impacto ambiental generado en el proceso de producción de azúcar crudo.

Saavedra & Rocío (2018) realizaron una comparación y evaluación ambiental de todo el ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar, tanto en su modalidad tradicional como en su modalidad orgánica. El propósito del artículo fue examinar cada uno de los procesos del cultivo y determinar para cada caso cuáles son los impactos ambientales más significativos que deberían ser tomados en cuenta a la hora de proponer planes de mejoramiento ambiental. Para esto se implementó la metodología de ACV que permite no sólo analizar

cada uno de los procesos que se llevan a cabo en los cultivos, teniendo en cuenta sus insumos, productos y desechos, sino también cuantificar los impactos ambientales a lo largo de todo el proceso de crecimiento y cosecha de la planta.

Considerando que el concepto de ciclo de vida involucra el análisis, documentación y cuantificación de las cargas ambientales de la vida completa de un producto, de la cuna hasta la tumba, y su servicio asociado, es preciso citar que la investigación realizada no cubrió todos los aspectos relacionados con el azúcar como producto. En esta investigación el objeto de estudio se limitó a la parte del proceso que corresponde al cultivo de caña, como proyecto inicial del análisis de ciclo de vida del azúcar como producto.

El método emergético es otra metodología aplicada por los autores como indicador de economía ecológica para medir sustentabilidad. En la actualidad se han realizado diversos estudios utilizando esta técnica en el proceso de fabricación de azúcar, de ellas se pueden citar:

López, García & Valdés (2018) evalúan la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo a partir de la caña de azúcar en una UEB de la provincia de Cienfuegos. Para ello se utilizó la Metodología Emergética, dicha evaluación permitió conocer las transformidades de los principales productos de la fábrica siendo: azúcar crudo y electricidad. Se determinó además la emergía específica de otros co-productos importantes como son: bagazo, miel final y cachaza. Los resultados obtenidos en la investigación indican que el sistema debe ser reestructurado para mejorar su eficiencia y permitir un mayor aprovechamiento de los recursos.

Abreu (2017) investiga la producción de caña de azúcar asociada a una UEB, con el objetivo de evaluarla emergéticamente, a fin de contribuir al logro de una agricultura sostenible. Como resultados, se determinó que el proceso de obtención de caña de azúcar depende de materiales de la economía en casi toda su totalidad y una menor parte se sustenta en los recursos renovables de la naturaleza. Se cuantificó la transformidad de la caña de azúcar y los índices emergéticos, en su mayoría, tuvieron resultados adversos, por lo que se propuso la disminución del empleo de los fertilizantes tradicionales y la implantación de sistemas de riego en las unidades cañeras objeto de estudio.

Capítulo II

CAPITULO II: METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EMERGÉTICA PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN CENTRAL AZUCARERO.

2.1 Características del objeto de estudio

2.1.1 Localización geográfica

La “UEB Central Azucarero Ciudad Caracas” (Figura 2.1) fue creado por Resolución 222/2006 del Ministerio de Azúcar con domicilio legal en el batey del mismo nombre y está situada geográficamente en el municipio de Santa Isabel de las Lajas, provincia de Cienfuegos. Limita al norte con la UEB Efraín Alfonso de Villa Clara, al sur con la UEB Elpidio Gómez, al Este con el municipio de Cruces, y al Oeste con la UEB 5 de Septiembre. Se localiza en la carretera a Lajas, a 4 kilómetros del poblado de igual nombre y a 46 kilómetros del municipio de Cienfuegos, y pertenece a la Empresa Azucarera



Cienfuegos.

Figura 2.1: Vista superior de la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”. Fuente: Google Maps.

2.1.2 Fase Agrícola

El desarrollo de la caña de azúcar presenta un periodo de crecimiento que varía entre 11 y 17 meses, dependiendo de la variedad y de la zona. Requiere de nitrógeno, potasio y elementos menores para su fertilización. En zonas salinas se adiciona azufre para controlar el sodio. Se puede cosechar manualmente o con máquinas.

En Cuba, para la cosecha de la caña de azúcar en casi su totalidad se realiza con maquinaria para efectuar el corte de esta, aunque en algunos casos se hace manualmente en zonas donde se dificulta la entrada de las cosechadoras. Se realiza la quema de la plantación, cuando existe abundante maleza que impide el corte de la caña, siendo este mecanizado o manual. Este método no es de frecuente uso en nuestro país.

La caña es un cultivo tropical que depende en gran medida del tipo de suelo y las condiciones climáticas de la región donde será cultivada. Los componentes del clima que afectan de manera más significativa el crecimiento y desarrollo del cultivo son la humedad del suelo, la luminosidad, precipitaciones y temperatura.

Históricamente la zona de Caracas presenta valores medios de 25,2 °C de temperatura y 1 300 mm/año de precipitación, estos datos son reportados a partir de estudios realizados, para la cosecha de la caña de azúcar en la zona, aunque, según datos proporcionados por la UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas”, este valor ha descendido a 1 195,3 mm/año como promedio al finalizar el 2019. El caso particular de las precipitaciones es un factor determinante en la actividad agrícola de las unidades productoras, dada la ausencia de sistemas de riego en casi su totalidad y el enfrentamiento a etapas de fuertes sequías.

El municipio, de forma general está constituido por llanuras abrasivas plana, poco desmembradas (20 m a 80 m) y con pendientes suaves. Con respecto al tipo de suelo, las unidades productivas pertenecientes a la UEB presentan suelos muy variados. Sin embargo, se encuentran mayormente suelos de tipo fersialitizado cálcico, sialitizado cálcico y no cálcico, ferralitizado cuarcítico y vertisuelos. Esta clasificación se corresponde al “Agrupamiento agro-productivo de los suelos cubanos”, para el caso particular de la caña

de azúcar, realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA).

Al cierre del 2019, el balance de áreas realizado por la UEB Atención al productor “Ciudad Caracas” contabilizó un total de 15 536,77 ha, de este 3 506,21 ha se encuentran vacías y 12 030,56 ha se hallan con caña actualmente, de este valor corresponden a suelos ferralitizado cuarcítico 76,84 ha (0,5 %), fersialitizado cálcico 211,21 ha (1,4 %), vertisuelos 604,68 ha (4 %), sialitizado no cálcico 3 595,47 ha (23 %) y sialitizado cálcico 11 048,57 ha (71 %). Los suelos con mayor predominio son los sialitizado cálcico y no cálcico que a su vez constituyen los más factibles para la plantación de la caña. Los suelos sialitizado cálcico presentan buena profundidad efectiva mayores de 40 cm, pH neutro, buen contenido de materia orgánica, topografía o pendiente llana, drenaje medio y ligeramente compactado.

2.1.3 Fase Industrial

La UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas” dispone de una planta moledora integrada por un tándem completamente electrificado y se compone de 5 molinos Fulton inclinados. El central posee una capacidad de molienda de 4 025 t de caña al día. Cuenta con dos calentadores Vampiros y tres WEBER modificados, un Clarificador de Bajo Tiempo de Retención (BTR) con capacidad de 170,344 m³, dos pre-evaporadores con capacidades de 11,20 m³ y 15,00 m³ respectivamente, un cuádruple efecto de 60 m³, siete tachos que funcionan al vacío, dos cristalizadores rápido de 3^{ra}, un recibidor de Templas de segunda y finalmente posee 4 centrifugas ASEA de 1 000 kg para masa cocida A, una centrifuga ASBB de 1000 kg para masa cocida B y cinco centrifuga ASBB para masa cocida C con motores eléctricos de 1 750 revoluciones.

En el sistema de generación de vapor el combustible usado es el bagazo proveniente de la molienda. Existen dos generadores de vapor del tipo RETAL con capacidades instaladas de 12,5 kg/s y 16,7 kg/s con vapor sobrecalentado a una presión de 1 765,8 kPa y temperatura de 623 K (350 °C). Estos equipos son los encargados de que se transfiera el calor de los gases de combustión del bagazo al agua que se encuentra circulando por los tubos del generador de vapor, produciendo el vapor empleado en los turbogeneradores para generar electricidad.

El área de generación eléctrica cuenta con vapor directo de 1 762,29 kPa y 648 K (375°C) que va directamente a los dos turbogeneradores de 4,5 MW de capacidad nominal cada uno, luego pasa por la válvula reductora denominada de alta (VRA) que asume las diferentes fluctuaciones en el proceso para suplir las necesidades térmicas. En el escape de las turbinas de contrapresión y a la salida de la válvula reductora se obtiene el vapor con las propiedades idóneas para el proceso (presión 147,15 kPa y temperatura 393,15 K).

De la línea de vapor de escape de los turbogeneradores, se alimentan los dos primeros vasos (pre-evaporadores) así como el calentador de jugo claro. La evaporación (extracción) del primer vaso se usa como medio de calentamiento de jugo alcalizado en los intercambiadores denominados primario y secundario, así como en la estación de tachos y en el tercer vaso evaporador donde luego ocurren las evaporaciones de los demás vasos.

Hay que destacar que no toda la electricidad producida es entregada al SEN debido a que parte de esa energía es utilizada en la fábrica para el movimiento de los equipos de preparación, del tándem, centrífugas, cristalizadores, bombas de inyección entre otros a partir de motores eléctricos, así como para proveer los edificios administrativos. En el **Anexo 1**, se puede observar la integración del bloque de cogeneración y el proceso de fabricación (DFP).

El sistema de tratamiento de residuales de la fábrica posee un sistema de dos lagunas de oxidación en serie, por la profundidad de las lagunas el tratamiento es facultativo en el límite con el anaeróbico. Para su diseño fue concebido además un pequeño embalse para el tratamiento de las corrientes con contaminantes químicos luego de las limpiezas de los equipos tecnológicos y el mismo tiene la capacidad para disponer durante un tiempo de zafra de estas corrientes hasta su evaporación producto del sol.

Por último, la actividad económica fundamental de la empresa es la producción de azúcar crudo, pero paralelamente se obtienen ingresos por la venta de energía eléctrica, otros derivados (miel, cachaza y bagazo) así como algunas producciones agropecuarias.

2.2 Análisis emergético

2.2.1 Definición de los límites espacio-temporales

En esta etapa se delimitó la zona y el tiempo sometido a análisis. En este sentido, se enmarcó espacialmente la investigación a las zonas correspondientes a la fase agrícola e industrial de la UEB “Ciudad Caracas” considerando como base para el análisis de los flujos energéticos el año 2019. 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 UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas”. La delimitación facilita la identificación de las corrientes de entrada/salida del sistema y su interrelación.

2.2.2 Modelación emergética

En este estudio los principales símbolos usados fueron los correspondientes a: system boundary (límite del sistema), sources (fuentes), pathway lines (flujos), producer (bloque de cogeneración), box (proceso de fabricación de azúcar), tank (almacenamiento de agua y productos químicos), interaction (interacciones internas), transaction (pago por servicios) y el imprescindible heat drain (degradación energética) producto de la segunda ley de la termodinámica. En la Figura 2.2 se pueden ver resumidos estos símbolos.

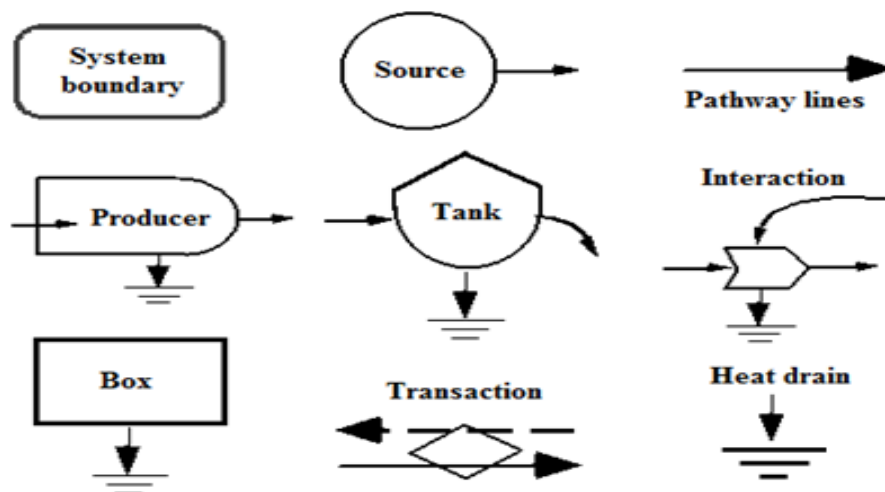


Figura 2.2. Símbolos usados en este trabajo. Fuente. (Valdés, 2017).

2.2.3 Balance energético del sistema

Fase Agrícola:

En esta fase, se determinaron los flujos de energía solar, energía de la lluvia, energía por evapotranspiración, pérdida de energía del suelo por erosión, combustible consumido,

energía de la maquinaria agrícola, fertilizantes empleados, herbicidas/pesticidas/fungicidas utilizados, energía de la mano de obra y el costo de los servicios importados de la economía.

A continuación, se especifican las ecuaciones empleadas en el cálculo de cada uno de estos flujos y los datos necesarios para la obtención de los resultados.

- Energía solar.

Para el cálculo de la energía que el Sol aporta al sistema se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_{sol} = \text{Área} \cdot \text{Insolación promedio} \cdot (1 - \text{albedo}) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

A partir de datos recopilados de UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas” se pudo comprobar que el área correspondiente a la producción al cierre 2019 fue 8 757,8 ha (87 578 000 m²). Con respecto a la insolación promedio, Bértiz Pérez (2015) afirma que Cuba recibe un promedio de 5 (kW/m²) /día. A fin de facilitar el trabajo con las unidades de medida para la obtención del resultado final en unidad emergética, este dato será valorado como $6,57 \cdot 10^{13}$ (J/ha)/año. Por otra parte, NASA (2016a) estima un albedo del 0,08 para la Florida, valor que puede ser utilizado para nuestro país por la similitud de condiciones. Según NASA (2016b), el albedo representa la fracción de energía solar reflejada por la superficie de la Tierra de vuelta al espacio y tiene un valor máximo de 1. Una vez conocidos estos datos se obtiene la energía solar, en J/año, para las condiciones delimitadas en el objeto de estudio.

- Energía de la lluvia.

Para conocer la energía que la lluvia aportó al sistema se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_{ll} = \text{lluvia} \cdot \text{Área} \cdot \rho(\text{H}_2\text{O}) \cdot E_{\text{Gibbs}}(\text{H}_2\text{O}) \cdot (1 - \text{escorrentía}) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Mediante el Control Estadístico de Precipitaciones llevado a cabo por la UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas”, se conoció que al cierre del 2019 se obtuvo un promedio de 1,19 m/año aproximadamente. Como se señaló anteriormente, se analizan 87 578 000 m² del terreno cultivable. Con respecto a variables propias del agua, Rosabal Vega & Valle Matos (2010) considera una densidad aproximada de 997,13 kg/m³, para una temperatura

de 25 °C y una energía libre de 4 940 J/kg. El coeficiente de escorrentía representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de escorrentía superficial y el de precipitación total sobre un área determinada (Tutoriales al Día -Ingeniería Civil, 2013). Su valor fluctúa entre cero y uno, mientras que para suelos cultivados este valor oscila entre 0,05 y 0,2 dependiendo de la pendiente del terreno (Bienes, 2001). Si tenemos en cuenta que en los suelos del caso de estudio las pendientes son suaves, se puede estimar un coeficiente medio de 0,07. Una vez conocidos estos datos se obtiene la energía de la lluvia, en J/año, para las condiciones delimitadas en el objeto de estudio.

- Energía por evapotranspiración

La evapotranspiración de la caña de azúcar se refiere a la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa, junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Además de ser un componente del ciclo hidrológico, la evapotranspiración interviene en el balance calorífico y en la redistribución de energía mediante los traspasos que de ella se producen con los cambios de estado del agua, permitiendo así un equilibrio entre la energía recibida y la perdida (Jensen, Burman, & Allen, 2006). Según estudios realizados por Brandt Williams (2001), este factor para la caña es aproximadamente de 2,76E+10 (J/acre)/año para la caña de azúcar. El área utilizada en el sistema se encuentra expresada en ha, por lo que para su conversión a acres debe ser multiplicada por el factor de conversión de 2,47 acre/ha, a fin de corregir las unidades y obtener el flujo de energía por evapotranspiración expresado en J/año como se muestra en la ecuación 2.3.

$$E_{ev} = \text{Evapotranspiración} \cdot \text{Área cañera} \cdot 2,47 \text{ acre/ ha} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

- Erosión o pérdida de energía del suelo

Las pérdidas de energía del suelo forman parte de los procesos geológicos que ocurren en este y se determinaron por la siguiente ecuación:

$$E_{p\acute{e}rdida} = \text{P\acute{e}rdida de suelo} \cdot \text{Materia Org\acute{a}nica (MO \%)} \cdot \text{Energ\acute{a}MO} \cdot 4186 \text{ J/kcal} \quad \text{Ecuaci\acute{o}n 2.4}$$

La materia orgánica contenida en el suelo es una variable de gran importancia en este cálculo. Referidas a ella se encuentran dos variables, el por ciento presente en el suelo y la energía que aporta esta materia al cultivo. Las investigaciones realizadas por H. Odum (1996) demostraron que la materia orgánica constituye el 4 % del suelo, aportando 5,4 (kcal/g) según Ulgiati y col. (1995). Otra variable importante es la pérdida del suelo por erosión. Esta incógnita se cuantificó por la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdidas de suelo} = \text{Área sembrada} \cdot \text{Tasa de erosión} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

El área como se conoce se cuantifico en 87 578 000 m². Con respecto a la tasa de erosión, Brandt Williams (2001) estimó que, para el cultivo de la caña de azúcar, el suelo muestra un valor aproximado de 850 (g/m²)/año. Como resultado de la multiplicación de ambas, se obtienen las pérdidas del suelo en g/año. Una vez calculadas las pérdidas del suelo y multiplicadas por las variables referidas a la materia orgánica, se multiplicó esta expresión por un factor de conversión de 4 186 J/kcal a fin de obtener la pérdida de energía en J/año.

- Energía del combustible

El flujo de energía aportado por el combustible se determinó según se muestra en la ecuación 2.6:

$$E_{\text{comb}} = C_C \cdot PC \quad \text{Ecuación 2.6}$$

El combustible consumido (C_C) en el proceso agrícola para el cultivo de la caña de azúcar en las unidades productoras cañeras que tributan a la UEB “Ciudad Caracas”, se estimó al cierre del 2019 un total de 8 620 l/año de gasolina y 1 707 585 l/año de diésel. Este valor se multiplicó por su poder calórico (PC), según Cengel (2019) el poder calórico correspondiente a la gasolina es de 31 850 000 J/l y al diésel 33 170 000 J/l. La energía del combustible fue expresada en J/año, representando la cantidad de energía presente en un litro de combustible.

- Energía de la maquinaria agrícola

La energía aportada por la maquinaria agrícola de este tipo de sistema fue contabilizada en unidades másicas por Pimentel, Harvey, & Resosudarmo (1995) como 55 400 g/año.

- Energía de los fertilizantes

La energía aportada por los fertilizantes al proceso se compone por los fertilizantes fosfóricos, potásicos y nitrogenados dada su protagónica influencia en la actividad agrícola. Al igual que en el caso previo, la energía se contabilizó en unidades másicas, específicamente según el consumo anual de cada tipo de fertilizante. A continuación, se muestran la ecuación con las que se determinó el consumo anual de cada producto expresados en g/año. En la ecuación se relacionan el flujo de fertilizantes en correspondencia con las masas molares del ingrediente activo y el fertilizante.

$$\text{Consumo anual} = \text{flujo de fertilizante} \cdot \frac{M(\text{ingrediente activo})}{M(\text{fertilizante})} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Estos datos fueron adquiridos en el informe de Distribución de Fertilizantes al cierre del 2019 en la UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas”. En este informe se mostró un consumo anual de flujo de fertilizante de 400 000 kg de superfosfato triple; 750 000 kg de cloruro de potasio; 700 000 kg de urea, 250 000 kg de amoníaco y 900 000 kg de nitratos.

- Energía de los fungicidas, insecticidas y herbicidas.

Según datos recolectados en el informe sobre “Uso y Existencia de Herbicidas-Pesticidas-Fungicidas” realizado por la UEB Atención al Productor “Ciudad Caracas”, se cuantificaron 15 herbicidas; 2 fungicidas y 4 insecticidas al cierre del período 2019. Al igual que en el caso anterior, la energía entregada al sistema por estos agroquímicos se contabilizó según su consumo anual en unidades de masa g/año. La ecuación 2.8 muestra la conversión utilizada para llevar de unidades volumétricas a másicas.

$$E_{\text{agroquí}} = \text{consumo de agroquímicos (litros)} \cdot \rho_{\text{agroquí}} \text{ (g/l)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

- Energía de la mano de obra

La energía aportada por la labor humana al proceso se contabilizó según la siguiente ecuación:

$$E_{\text{mo}} = \text{cantidad de trabajadores} \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{días}} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kcal}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Por datos proporcionados por el departamento de Recursos Humanos que atiende a las unidades productivas asociadas a la UEB “Ciudad Caracas”, se conoció que en el proceso agrícola existen un total 339 trabajadores, donde una persona consume 2 500 kcal de energía metabolizada/día, el factor de conversión 4 186 J/kcal, se utilizó únicamente para la conversión de unidades a fin de expresar la energía de la mano de obra en J/año.

- Servicios no renovables o importados de la economía

Los servicios importados al sistema se contabilizan en (\$/año) y se refieren a todos aquellos insumos o materiales que no se producen en el proceso analizado y son necesarios para el mismo. El departamento económico de la UEB Atención Productor “Ciudad Caracas” que presta sus servicios a las unidades productivas que tributan a ésta, no estimó al cierre de 2019 ningún gasto adicional correspondiente a servicios importados de la economía.

Fase Industrial:

Para la elaboración de los balances energéticos del sistema en estudio, debido a su complejidad manualmente se utilizó el simulador Sistema TermoAzúcar STA 4.1. 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 manipular gran cantidad de información en las corrientes y los equipos del proceso. Para este trabajo se consideró el Diagrama de Flujo de Información (DFI) de la Figura 2.3.

El DFI es una representación gráfica del sentido en que fluye la información inicial y la que se origina durante los cálculos. Está formado por módulos de cálculo que representan matemáticamente lo que ocurre en los equipos y/o subprocesos y las corrientes o flujos de informaciones que entran y salen de los módulos. Para la confección del DFI se requiere del conocimiento del Diagrama de Flujo del Proceso (DFP). Debe tenerse en cuenta que no siempre el sentido de flujo de la información tiene que coincidir con el de los flujos de materiales y energía en el proceso (Álvarez, 2016).

Para realizar la simulación 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 simulador 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 a la determinación de flujos de salida del sistema como a aquellos que cuantifican las pérdidas energéticas en el proceso (Tabla 2.1)

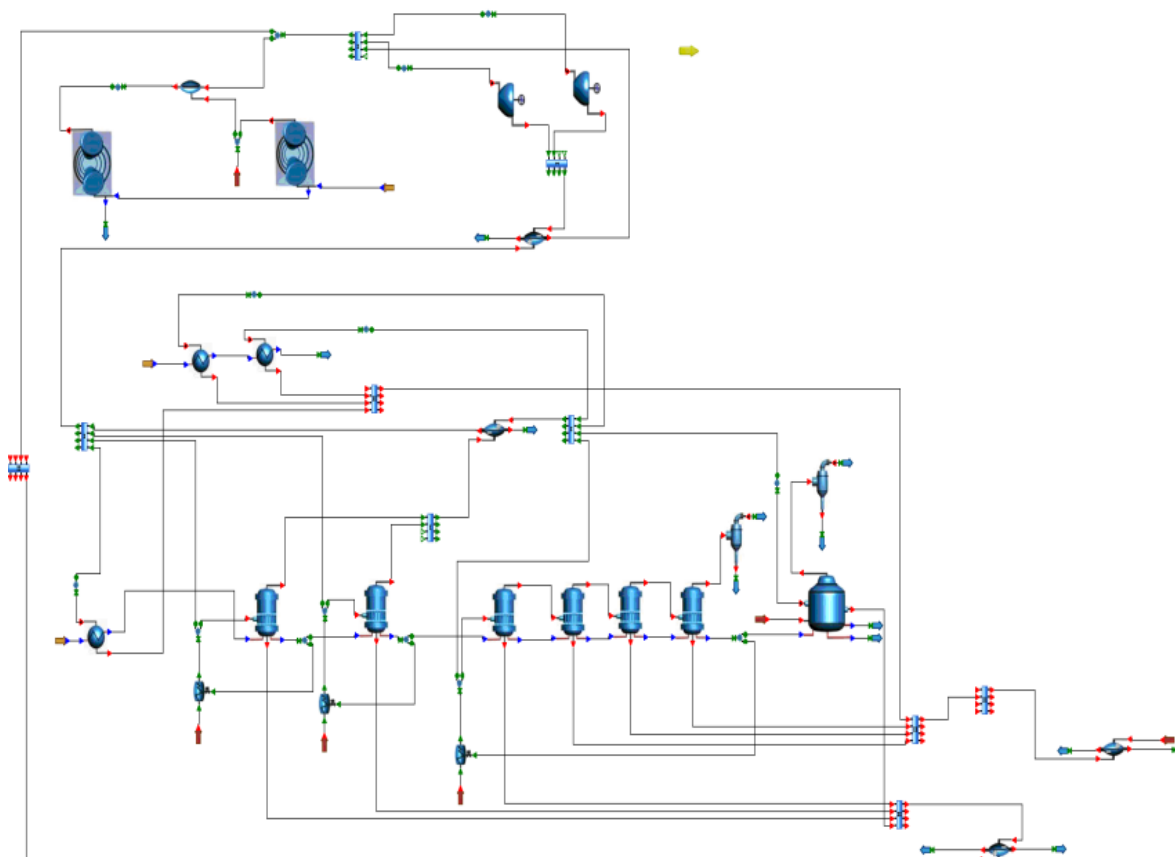


Figura 2.3 Diagrama de Flujo de Información (DFI) Ciudad Caracas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.1. Indicadores seleccionados del Sistema TermoAzúcar STA 4.1 Fuente. Elaboración propia.

INDICADORES	UNIDADES
Producción eléctrica específica de la fábrica	kWh/t de caña
Demanda eléctrica específica de la fábrica	kWh/t de caña
Electricidad vendida al SEN	kWh/t de caña
Rendimiento industrial	%
Tasa de evaporación del múltiple efecto	kg/h·m ²
Economía del área de evaporación	adimensional
Pérdidas calor evaporación al condensador barométrico del múltiple efecto	% demanda de escape del proceso
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de casa de calderas	% demanda de escape del proceso

Bagazo disponible	% flujo másico en caña
Bagazo sobrante	% flujo másico en caña
Miel final	% flujo másico en caña
Azúcar producida	% flujo másico en caña

Para calcular la producción, demanda eléctrica específica de la fábrica y electricidad vendida al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) se multiplicaron los indicadores obtenidos por las toneladas de caña molidas en la zafra y luego se afectaron por el factor de conversión especificado en el acápite 1.3.1 como se muestra en la ecuación 2.10

$$\text{Electricidad} \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{kWh}}{\text{t de caña}} \cdot \frac{\text{t caña}}{\text{año}} \cdot \frac{3.6 \cdot 10^6 \text{J}}{\text{kWh}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

La mayoría de los estudios emergéticos reportan las unidades de valor emergético (UEV en inglés) para los flujos másicos en seJ/g por lo que las corrientes de bagazo sobrante, miel final y azúcar producida se convirtieron a g/año. Para hacer esto se divide por 100 estos indicadores expresados en % flujo másico en caña obteniéndose las toneladas de producto por toneladas de caña molida, luego se multiplica por las toneladas de caña molidas en la zafra y se afecta por un factor de conversión como muestra la ecuación 2.11

$$\text{Flujo} \left(\frac{\text{g}}{\text{año}} \right) = \frac{\% \text{ flujo másico en caña}}{100} \cdot \frac{\text{t caña}}{\text{año}} \cdot \frac{10^6 \text{g}}{1 \text{ t}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Para determinar el aire necesario para quemar el bagazo se evaluó primero la cantidad de bagazo consumido ya que se conoce el bagazo disponible ($B_{\text{disponible}}$) y sobrante (B_{sobrante}) en la fábrica expresado como % flujo másico en caña. El procedimiento se expresa en la ecuación 2.12

$$\text{Bagazo} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = \frac{(B_{\text{disponible}} - B_{\text{sobrante}})}{100} \cdot \frac{\text{t caña}}{\text{año}} \cdot \frac{10^3 \text{kg}}{1 \text{ t}} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

El bagazo está formado en más o menos la mitad de su masa por fibras y, el resto, por agua y sólidos solubles. La composición varía en dependencia del procedimiento de molienda usado y la calidad y variedad de la caña molida. Dado que no fue posible realizar un análisis elemental se asumieron los valores de la Tabla 2.2 para el cálculo de la relación aire teórico/combustible como se muestra en la ecuación 2.13

Tabla 2.2. Análisis típico del bagazo. **Fuente.** (Rein, 2012).

	Seco, libre de cenizas	Húmedo, como se quema
--	------------------------	-----------------------

	en %	en %
Análisis próximo		
Humedad		52
Carbono fijo	12,94	5,95
Volátiles	87,06	40,05
Cenizas		2
	100	100
°Brix		2
Poder calórico superior-GCV en kJ/kg		8956
Poder calórico inferior-NCV en kJ/kg		7130
Análisis último		
Humedad		52
Carbono	47,89	22,04
Hidrógeno	5,92	2,72
Nitrógeno	0,33	0,15
Azufre total	0,05	0,02
Oxígeno	45,81	21,07
Cenizas		2
	100	100

$$W_{at} \left(\frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}} \right) = 11.5 \cdot C + 34.5 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4.32 \cdot S \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Luego para calcular el flujo de aire para la combustión se multiplicó el flujo de bagazo quemado por la relación aire/bagazo considerando un valor de 15 % de aire en exceso como se observa en la ecuación 2.14

$$\text{Aire} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = 1.15 \cdot \text{Bagazo quemado} \cdot W_{at} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Según Moring (2006) la composición gravimétrica del aire es 23,1 % de O₂, 76,9 % N₂, en peso, es decir que hay 3,32 kg N₂/kg O₂. De acuerdo a lo anterior, este flujo puede ser asumido como un recurso renovable (R) y parte como un recurso no renovable (N). Para este trabajo no se pudo analizar la composición de los gases de combustión de la fábrica por lo que se asumió que para una combustión completa sin formación de óxidos de nitrógeno

aproximadamente se utiliza el 23,1 % de la masa de aire. Por tanto, se estimó la fracción de aire no renovable considerando un 15 % de aire en exceso según la ecuación 2.15.

$$f_{\text{Aire}_N} = \frac{0,231 \cdot \text{Bagazo quemado} \cdot W_{\text{at}}}{1,15 \cdot \text{Bagazo quemado} \cdot W_{\text{at}}} \approx 0.201 \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Como no se encontró en la literatura consultada unidades de valor emergético para el aire referidos a la masa se calculó su contenido emergético para una temperatura de 300 K. Para esa temperatura su capacidad calorífica (Cp) es 1,007 kJ/kg·K (Incropera, 2007), por lo que el flujo de aire que entra al proceso se calculó según la ecuación 2.16. Entonces las fracciones renovables y no renovables fueron calculadas por las ecuaciones 2.17 y 2.18 respectivamente.

$$\text{Aire} \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = \left[\text{Aire} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) \cdot C_p \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot T(\text{K}) \right] \cdot \frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$\text{Aire}_R \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = 0,799 \cdot \text{Aire} \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$\text{Aire}_N \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) = 0,201 \cdot \text{Aire} \left(\frac{\text{J}}{\text{año}} \right) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Por datos proporcionados por el departamento de Recursos Humanos se conoció que en el proceso industrial existen un total 452 trabajadores. La energía aportada por la labor humana al proceso se contabilizó según la Ecuación 2.9 referenciada anteriormente.

2.2.4 Construcción de la tabla emergética

Una vez determinado el balance emergético y energético del sistema se procede a la construcción de la tabla de contabilidad emergética a partir de las corrientes y flujos identificados del sistema agro-industrial, usualmente esta contiene siete columnas como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Ejemplo típico de una tabla emergética. Fuente. (Lomas, P., 2009).

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (emS/año)
1	Item1	xx.x	J/año	xxx.x	Em ₁	Em ₁ /EMR
2	Item2	xx.x	g/año	xxx.x	Em ₂	Em ₂ /EMR
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
n.	Ene-ésimo Item	xx.x	J/año	xxx.x	Em _n	Em _n /EMR
Y	Y-ésimo Producto	xx.x	J ó g/año	$\frac{\sum_n Em_i}{xx.x}$	$\sum_n Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n Em_i}{PIB}$

En la columna 1 (Nota), se expresa el orden de las corrientes identificadas del proceso en estudio. En la columna 2 (Item), se indica el nombre de dichas corrientes, correspondiente a cada una de estas, en la columna 3 (Datos) se muestra su contenido energético, másico o monetario en las condiciones del sistema; las unidades adecuadas (joule, gramos o pesos) de estos datos se especifican en la columna 4 (Unidad). En la columna 5 se presentan las transformidades, expresadas en seJ/J. Multiplicando los valores correspondientes de la columna 3 y 5, se obtiene la energía de cada corriente en la columna 6 (Energía). En las últimas filas de la Tabla se especifica la energía total del sistema, la energía por unidad de masa, transformidad del producto y el rendimiento del proceso referido a unidades másicas y energéticas.

Después de construida la Tabla de contabilidad emergética se procede al cálculo de los índices emergéticos con el propósito de caracterizar de forma más precisa y valorable al sistema. Los índices emergéticos pueden estar referidos al impacto ambiental o social del proceso productivo, a la eficiencia en el uso de las diferentes fuentes energéticas y, principalmente, puede indicar la sostenibilidad del sistema. Se emplean generalmente a fin de comparar procesos bajo el control humano, cuando un camino sustentable no está garantizado y la selección de uno u otro debe estar sustentada por minuciosas consideraciones y numerosos parámetros.

2.2.5 Cálculo y análisis de los indicadores emergéticos

Para el análisis emergético, se clasifican las entradas al sistema en recursos naturales renovables (R) y no renovables (N), así como los adquiridos de la economía (F). Los recursos recibidos de la economía a su vez se separaron en materiales (M) y servicios (S). De esta manera para cuantificar el consumo de recursos de la naturaleza (I) y de la economía (F). Esto establece una relación funcional de la emergía con la energía, el medio ambiente y la economía. Los indicadores usados en este trabajo y la manera de calcularlos aparecen detallados a continuación:

Transformidad y emergía específica:

La transformidad (Tr) es la relación entre la emergía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (Ep), su unidad es en seJ/J. Este índice revela una cualidad del sistema, cuanto mayor transformidad más emergía se requiere para generar productos. En la ecuación 2.19 se muestra su cálculo.

$$Tr = \frac{Y}{E_p} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

La emergía específica se define como la emergía total (Y) por unidad de masa de los productos de salida (P) por lo que su unidad es usualmente seJ/g. Como la energía es requerida para concentrar los materiales esta unidad de valor emergético (UEV) incrementa con la concentración de las sustancias. Su interpretación es similar al de la transformidad lo que en términos de masa. Tanto la transformidad como la emergía específica permite realizar comparaciones en términos de cuanto más o menos invierte un sistema para producir un bien. Esta es calculada a través de la ecuación 2.20.

$$Em = \frac{Y}{P} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

En este trabajo se obtuvo primeramente la emergía específica del azúcar y luego se calculó su transformidad. La entalpía del azúcar cristalino para una temperatura (t) de 27 °C se estimó por la ecuación 2.21 (Rein, 2012). Luego dividiendo su emergía específica por este valor se obtiene su transformidad (ecuación 2.22).

$$h_s \left(\frac{J}{g} \right) = 1.1702 \cdot t + 0.001707 \cdot t^2 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$T_{\text{azúcar}} \left(\frac{\text{seJ}}{\text{J}} \right) = \frac{Em_{\text{azúcar}} \left(\frac{\text{seJ}}{\text{g}} \right)}{h_s \left(\frac{\text{J}}{\text{g}} \right)} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Razón de renovabilidad (*Renewability Ratio*, % R)

La razón de renovabilidad representa la fracción de los recursos renovables (R) respecto a la emergía total consumida por el sistema (Y). Los sistemas con un alto porcentaje de emergía renovable tienen mayor probabilidad de ser más sostenibles y prevalecer, es decir, tienen más capacidad de sobrevivir a un estrés económico, que aquellos que usan una gran cantidad de emergía no renovable. Su cálculo se lleva a cabo mediante la ecuación 2.23.

$$\%R = \left(\frac{R}{Y} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Razón de eficiencia emergética (*Emergy Yield Ratio*, EYR)

La razón de eficiencia emergética (EYR) es una medida de la habilidad del proceso para explotar y hacer disponible los recursos naturales por la inversión externa. Provee una mirada al proceso desde una perspectiva diferente ya que analiza la apropiación de los recursos locales lo que se interpreta como una contribución adicional a la economía. El valor menor posible del EYR es 1, que indica que un proceso entrega la misma cantidad de emergía que fue provista para su operación por lo que no fue capaz de explotar recursos naturales. Por consiguiente, procesos con EYR iguales a 1 o ligeramente superior no retroalimentan a la economía significativamente en términos emergéticos y solo transforman recursos que estaban disponibles de procesos previos por lo que, al hacer esto actúan más como procesos consumidores que como procesos creadores de oportunidades para el crecimiento del sistema (Brown & Ulgiati, 2004). La ecuación 2.24 muestra la manera de calcular este  ndice.

$$EYR = \frac{R + N + F}{F} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Bajos valores de EYR indican un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; por el contrario, altos valores de EYR indican la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico. Es decir, cuanto mayor es este índice, mayor será la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema. EYR <5 indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos

secundarios; materias primas como cemento, acero entre otros y $EYR > 5$ indica la utilización de recursos energéticos primarios (petróleo, carbón, gas natural, uranio, etc.) $EYR < 2$ indica que no hay contribución significativa de recursos locales y están asociados a procesos casi completamente manufacturados. Cuanto más alto es el índice de producción emergético, más energía está proporcionando un proceso al sistema frente a la que retira (Gálvez, 2016).

Razón de carga ambiental (*Environmental Loading Ratio*, ELR)

La razón de carga ambiental (ELR) compara la cantidad de recursos emergéticos no renovables y adquiridos de la economía ($N+F$) con la cantidad de recursos renovables (R). El ELR es una medida de la perturbación a la dinámica medioambiental local, generada por el desarrollo conducido por el exterior, claramente establece una diferencia entre recursos renovables y no renovables así que complementa la información provista por la transformidad. Los valores bajos de $ELR < 2$, indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental, cuando $ELR > 10$ hay una alta carga ambiental y cuando $3 < ELR < 10$ el impacto es considerado moderado. Este índice es alto para sistemas con muchas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos (Brown & Ulgiati, 2004). Para su cálculo se utiliza la ecuación 2.25.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Índice de sostenibilidad emergética (*Environmental Sustainability Index*, ESI)

Si el ELR y el EYR se combinan se crea un índice de sostenibilidad siendo una medida de la potencial contribución del sistema (EYR) por unidad de carga impuesta al sistema local (ELR). Este indicador (ESI) es útil para medir la apertura y los cambios de carga ocurridos a través del tiempo en procesos tecnológicos y economías (Brown & Ulgiati, 2004). Este índice se determina usando la ecuación 2.26.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Como se describe en la ecuación este índice expresa la capacidad de un sistema de proveer productos o servicios con un mínimo estrés medioambiental y un máximo beneficio económico. Cuando $ESI < 1$ el proceso no es sostenible a largo plazo, cuando $1 > ESI < 5$ se

presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo, con $ESI > 5$ el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. Pero es incorrecto pensar que entre mayor sea este índice, mucho mayor es la sostenibilidad del proceso, pues a $ESI > 10$ el proceso es considerado subdesarrollado (Brown & Ulgiati, 2004).

La metodología emergética siempre debe considerar todos los flujos de desechos como productos o co-productos, y calcular sus factores de intensidad de manera correspondiente (pero prestando especial atención a no contar dos veces los insumos de energía eléctrica cuando se trata de unidades funcionales múltiples). Por el contrario, el análisis de ciclo de vida distingue entre "flujos de residuos", "productos de desecho" y co-productos basados en el valor de mercado, y aplica diferentes reglas de asignación en consecuencia (Gala, Raugei, Ripa, & Ulgiati, 2015).

2.3 Recomendación de alternativas

Para un mayor entendimiento del proceso objeto de estudio, es necesario dirigir la investigación hacia nuevas alternativas que solucionen los problemas manifestados a través de la metodología emergética. En este sentido, las recomendaciones efectuadas giran en torno a disminuir los elevados consumos emergéticos del sistema identificados en el paso anterior y su repercusión en el resultado de los índices emergéticos. Las alternativas recomendadas deberán ser evaluadas en trabajos posteriores, preferentemente por la metodología emergética, pues son opciones no desarrolladas en el escenario estudiado y solamente fueron comprobadas con respecto a los parámetros evaluados en esta investigación.

Capítulo III

CAPITULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis emergético

3.1.1 Definición de los límites de Espacio-Temporales

El sistema objeto de estudio fue la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”, la investigación se efectuó en el proceso agro-industrial. Se evaluó la actividad cañera, el proceso de fabricación de azúcar y el bloque de cogeneración durante el año 2019 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.

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 residuales.

3.1.2 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 el caso del aire en la fase industrial, se estimó la fracción renovable y no renovable de este, como se muestra en las ecuaciones 2.17 y 2.18 del acápite 2.2.3. En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran los flujos de estas corrientes y su correspondiente clasificación.

Tabla 3.1. Clasificación de los principales insumos de la Fase Agrícola. Fuente. Elaboración propia

Insumos	Valor	Unidad	Ecuación	Clasificación
---------	-------	--------	----------	---------------

Radiación Solar	5,29E+17	J/año	Ecuación 2.1	R
Precipitaciones	4,77E+14	J/año	Ecuación 2.2	R
Evapotranspiración	5,97E+14	J/año	Ecuación 2.3	R
Pérdida del suelo	6,73E+13	J/año	Ecuación 2.4	N
Diésel	1,39E+09	g/año	Ecuación 2.6	M
Gasolina	6,72E+06	g/año	Ecuación 2.6	M
Maquinaria Agrícola	5,54E+04	g/año	-	M
Potasio	3,93E+08	g/año	Ecuación 2.7	M
Fósforo	3,49E+08	g/año	Ecuación 2.7	M
Nitrógeno	1,02E+09	g/año	Ecuación 2.7	M
Herbicidas, fungicidas e insecticidas	2,75E+07	g/año	Ecuación 2.8	M
Labor humana	1,29E+12	J/año	Ecuación 2.9	S

Tabla 3.2. Clasificación de los principales insumos de la Fase Industrial. Fuente. Elaboración propia

Insumos	Valor	Unidad	Ecuación	Clasificación
Aire	5,4001E+16	J/año	Ecuación 2.17	R
Aire	1,3585E+16	J/año	Ecuación 2.18	N
Agua	1,3960E+11	g/año	-	N
Diésel	3,2618E+07	g/año	Ecuación 2.6	M
Gasolina	6,2537E+06	g/año	Ecuación 2.6	M
Grasas y aceites lubricantes	49474540	g/año	-	M
Ácido clorhídrico	1,39E+07	g/año	-	M
Sosa cáustica	6,16E+06	g/año	-	M
Fosfato trisódico	4,62E+07	g/año	-	M
Otros productos químicos	1,79E+09	g/año	-	M
Servicios no renovables	5,35E+06	\$/año	-	S
Energía eléctrica comprada	6,49E+13	J/año	Ecuación 2.10	S
Labor humana	1,7265E+12	J/año	Ecuación 2.9	S

A partir de esta información y las características del esquema tecnológico se construyó el diagrama emergético como se observa en la Figura 3.1.

Este diagrama permite simplificar las complejidades del sistema para visualizar, de manera sencilla, 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 se 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 utiliza para la compra de nuevos activos. 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 en divisa al país 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.

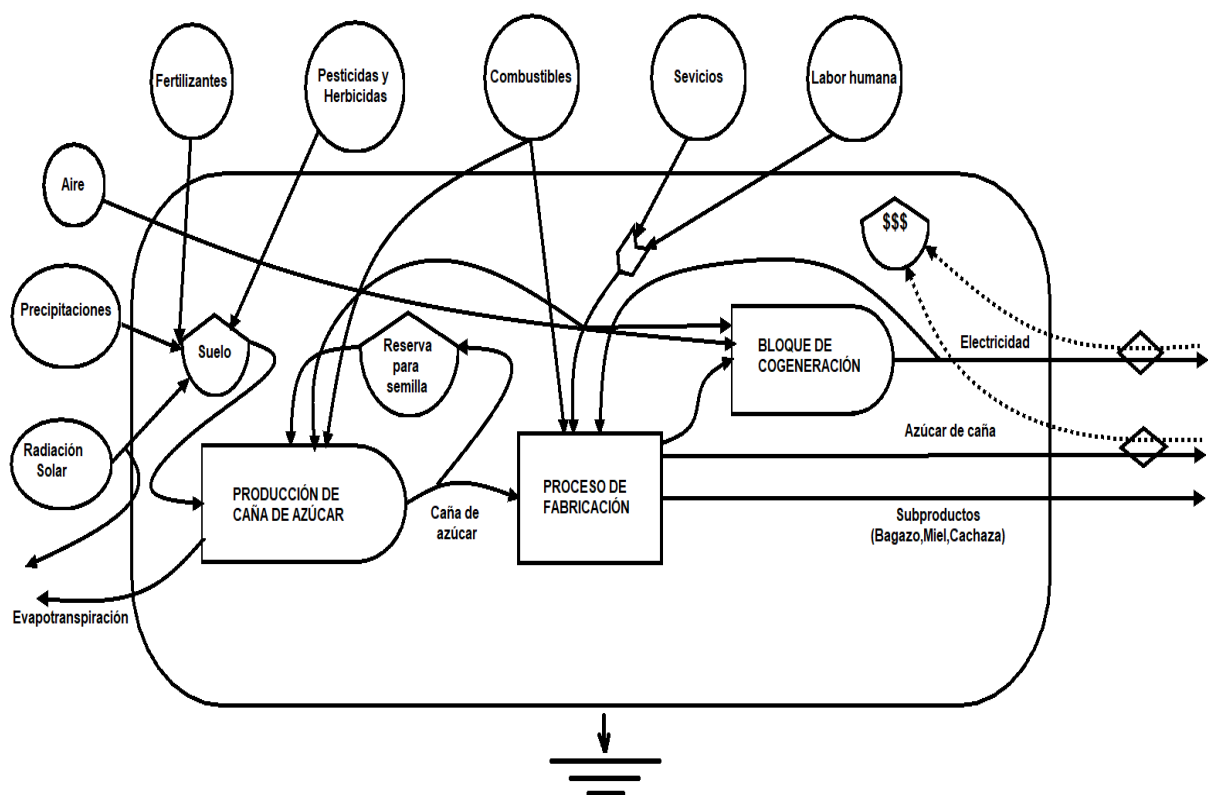


Figura 3.1. Diagrama emergético de la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”. Fuente. Elaboración propia.

3.1.3 Resultados del balance energético

En la Tabla 3.3 aparecen los indicadores seleccionados del TermoAzúcar mientras que en el **Anexo 2** se pueden observar todos los indicadores y reportes de corrientes del software. El balance obtenido merece las consideraciones que se exponen a continuación.

Tabla 3.3. Resultados de la simulación. Fuente. Elaboración propia.

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 calor evaporación al condensador barométrico del múltiple efecto	122,95	% demanda de escape del proceso
Pérdidas 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

Producción y demanda de electricidad

Los valores de producción y demanda eléctrica específica de la fábrica dependen intrínsecamente de las características de los turbogeneradores y de la conformación energética del sistema por lo que es difícil realizar comparaciones. Sin embargo, en la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas” la potencia nominal instalada es de 9 MW, pero solo se está generando 7,89 MW para una producción específica de 53,65 kWh/t de caña. Se puede concluir que solo se está aprovechando el 87,66 % de la capacidad nominal instalada por lo que existe la posibilidad de generar más electricidad. La demanda eléctrica específica de la fábrica fue de 11,92 kWh/t de caña, este indicador varía entre 15-32 kWh/t de caña (Victoria, 2009) y 20-35 kWh/t de caña (Rein, 2012), como se puede observar el valor está por debajo de los rangos establecidos, esto se debe a que la demanda de electricidad de una fábrica depende principalmente de la relación de molienda de caña, pero también si se utiliza turbinas para el accionamiento mecánico o motores eléctricos para las mayores

demandas, como las picadoras de caña, desmenuzadoras, accionamiento de molinos, ventiladores de tiro inducido y bombas de alimentación de calderas. Algunas fábricas incluyen entre sus cargas eléctricas elementos como oficinas administrativas, villas residenciales y otras infraestructuras. También utilizan el término "instalada" más que "absorbida" al referirse a la potencia. Esto puede hacer difícil la comparación de cargas eléctricas entre diferentes fábricas (Rein, 2012).

Las fábricas típicas de Sudáfrica tienen demandas eléctricas específicas de 21 a 22 kWh por tonelada de caña (kWh/tc) cuando utilizan turbinas de accionamiento mecánico en las cargas mayores de preparación de caña, y 29 a 31 kWh/tc cuando todos los accionamientos son eléctricos. Estas cifras no incluyen cargas por riego.

Por otra parte, para la molida considerada en el estudio de 432 301,002 t de caña /año el sistema aporta al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) 18 039 920,81 kWh/año de electricidad. El aporte real es menor pues como se señaló en el acápite anterior el sistema importa electricidad del SEN. Esto ocurre debido a que en determinados momentos el consumo de energía es mayor al producido, como por ejemplo en los arranques. A pesar de esto con la combustión del bagazo se explota significativamente el recurso biomasa lo que reduce la importación de crudo para las termoeléctricas favoreciendo por este concepto la economía del país.

Rendimiento Industrial

El rendimiento industrial obtenido fue de 16,19 %. Esto representa que por cada 100 t de caña molida se obtienen 16,19 t de azúcar; entonces, el rendimiento industrial viene a ser el azúcar comercial, reportada como por ciento peso de caña molida. Sin embargo, para la simulación 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.

Por consiguiente, es necesario sensibilizar a los productores cañeros de la repercusión de estos parámetros para el rendimiento del proceso industrial. No es solo producir altos volúmenes de caña; el cumplimiento de la calidad de esta en cuanto a % pol y materias

extrañas debe ser un parámetro para estimular al productor, o penalizar en caso de incumplimiento.

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 41 544,1263 toneladas de azúcar entre las 432 301,002 toneladas de caña molidas por la UEB “Ciudad Caracas” al cierre del 2019. De las 12 273,3 ha plantadas por las unidades productoras aledañas al ingenio equivalentes a 605 810,008 toneladas de caña, se conoce que solo se destinaron a la producción 8 757,8 ha, para un rendimiento cañero de 49,36 t de caña/ha. El resto constituye la fracción no molibles que es dejada para semilla y labores de las futuras cosechas.

Área de evaporación

La tasa de evaporación calculada para el múltiple efecto fue de $23,63 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ que es menor a los valores usuales reportados. En la práctica este indicador es mayor que $30 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ (Hugot, 1986) oscilando entre 29,3 y $39,1 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ (Victoria, 2009). Este valor indica un sobredimensionamiento del múltiple efecto, por lo que una alternativa podría ser, dadas las potencialidades de producir más electricidad, aumentar la molida diaria.

El área de evaporación también es el mayor consumidor de vapor de la fábrica, esto hace que uno de los indicadores más significativo sea la economía del vapor debido a su bajo valor. El primer principio de Rillieux establece que en un evaporador a múltiple efecto por cada kg de vapor que se use se obtendrán tantos kg de evaporación como vasos en serie posea el sistema (Rein, 2012), aunque en la práctica siempre es menor. Sin embargo, el valor de 2,54 destaca que la economía del vapor no es buena para el caso analizado.

La mala economía de los evaporadores influye negativamente en el aprovechamiento energético del vapor lo que puede ser causa al deterioro de los equipos o que estén operando en condiciones para los que no fueron originalmente diseñados.

Sumideros de energía

Hay que destacar que el vapor expulsado a la atmósfera y el sobrante de condensados puros constituyen importantes sumideros de energía en el proceso. El vapor expulsado a la atmósfera debería ser cero porque representa un gasto tanto de agua para la generación del

vapor como de energía ya que este no se utiliza para realizar trabajo. Esto ocurre producto de que la producción de vapor en los primeros vasos del múltiple efecto excede los requerimientos para la estación de tachos y calentadores. Una posible solución a este problema pudiera ser la disminución de la concentración en dichos vasos.

Por último, se determinó que para la simulación realizada 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.

3.1.4 Resultados de la tabla emergética

Para la construcción de la tabla emergética primero fueron identificadas las unidades de valor emergético de las principales corrientes de entrada al sistema. En la Tabla 3.4 y 3.5 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. Hay que destacar que durante la revisión bibliográfica se encontraron para algunas corrientes varias unidades de valor emergético por lo que fue necesario seleccionar las aquí mostradas. Para esto se tomó en consideración las características de los sistemas de las que fueron calculadas en comparación con las particularidades de las fuentes de abasto de la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”.

Tabla 3.4. Unidades de valor emergético usadas en la Fase Agrícola. Fuente. Elaboración propia.

Transformidad	Valor	Unidad	Referencia
Sol	1	seJ/J	Por definición
Lluvia *	1,80E+04	seJ/J	(H. T. Odum et al., 2000)
Evapotranspiración *	15 423	seJ/J	(H. Odum, 1996)
Pérdida del suelo *	7,38E+04	seJ/J	(H. Odum, 1996)
Diésel	2,83E+09	seJ/g	(Bastianoni et al, 2009)
Gasolina	2,92E+09	seJ/g	(Bastianoni et al, 2009)
Maquinaria Agrícola	1,12E+10	seJ/g	(Brown & Ulgiati, 2004)
Potasio *	1,85E+09	seJ/g	(H. Odum, 1996)
Fósforo *	2,20E+10	seJ/g	(Brandt Williams, 1999)
Nitrógeno *	2,41E+10	seJ/g	(Brandt Williams, 1999)
Herbicidas, fungicidas e insecticidas *	1,48E+10	seJ/g	(Brown & Arding, 1991)

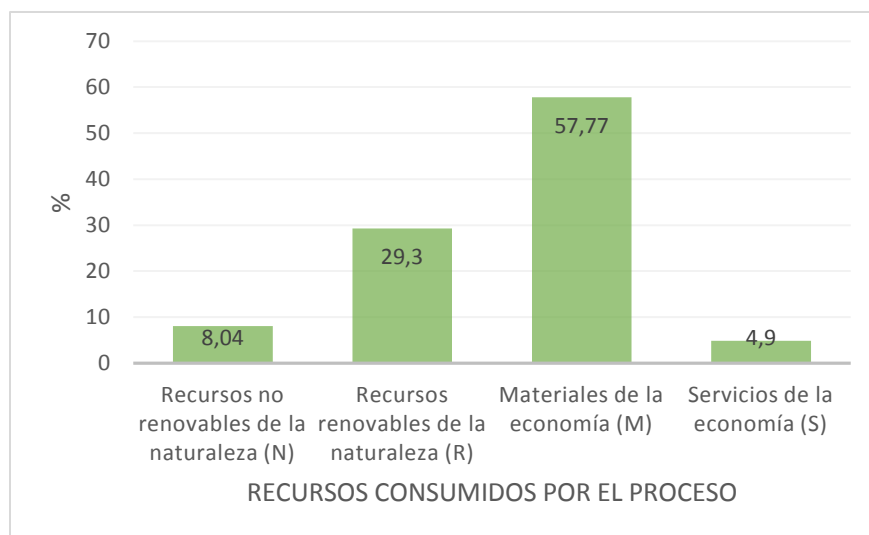
Labor humana	3,93E+06	seJ/J	(Giannetti, B., F. et al., 2016)
--------------	----------	-------	----------------------------------

Tabla 3.5. Unidades de valor emergético usadas en la fase industrial. Fuente. Elaboración propia.

Transformidad	Valor	Unidad	Referencia
Aire	9,82E+02	seJ/J	(Odum, H., T., 2000a)
Agua *	3,23E+05	seJ/g	(Buenfil, 2001)
Diésel	2,83E+09	seJ/g	(Bastianoni et al, 2009)
Gasolina	2,92E+09	seJ/g	(Bastianoni et al, 2009)
Grasas y aceites lubricantes	6,60E+04	seJ/g	(Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2002)
Ácido clorhídrico *	3,64E+09	seJ/g	(Jarméus, 2013)
Sosa cáustica *	1,90E+09	seJ/g	(Simoncini, E. et al., 2009)
Fosfato trisódico	9,35E+09	seJ/g	(Giannetti, B., F. et al., 2016)
Otros productos químicos	3,80E+08	seJ/g	(Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2002)
Servicios no renovables	4,60E+12	seJ/\$	(ISAER, 2016)
Energía eléctrica comprada	3,40E+05	seJ/J	(Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004)
Labor humana	3,93E+06	seJ/j	(Giannetti, B., F. et al., 2016)

Una vez conocidos los flujos de las principales corrientes (Tablas 3.1 y 3.2) y sus transformidades (Tablas 3.4 y 3.5) se procedió a la construcción de la tabla emergética para el sistema objeto de estudio, como se puede observar en el **Anexo 3**. Hay que destacar que previamente fue necesario realizar un análisis dimensional para evitar incongruencias al determinar la emergía de cada insumo.

Si analizamos el sistema en estudio por separado, podemos comprobar que en la Fase Agrícola el principal flujo emergético corresponde a los materiales de la economía con un 57,77 % (Figura 3.2), de ellos el consumo de fertilizantes principalmente los nitrogenados constituyen un valor de emergía significativo al proceso agro-cañero (Figura 3.3), si bien los fertilizantes representan los flujos emergéticos de mayores porcentajes, no podemos 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.

Figura 3.2. Proporción de la emergía total por categoría en la Fase Agrícola. Fuente. Elaboración propia.

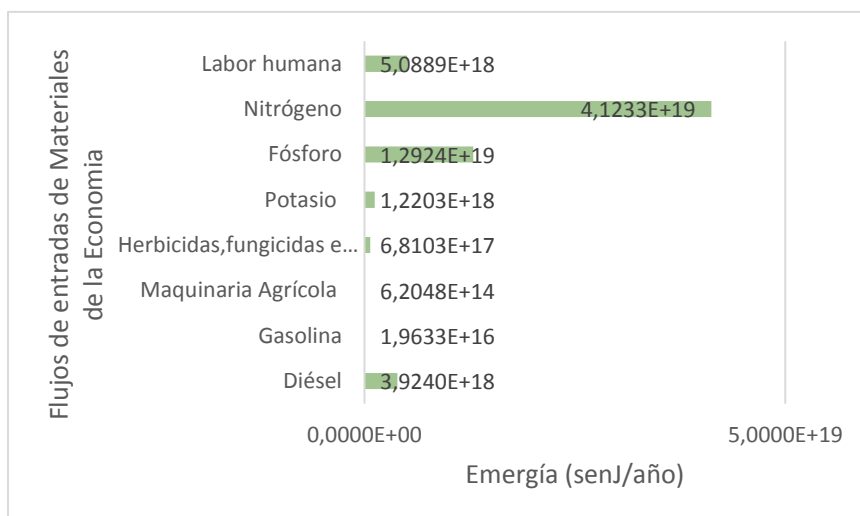


Figura 3.3. Consumo energético de Materiales de la Economía en la Fase Agrícola. Fuente. Elaboración propia.

Al analizar la Fase Industrial podemos observar (Figura 3.4) que el principal flujo energético corresponde a los servicios de la economía con un 44,11 %, este valor relativamente alto está dado 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 lo integran los servicios representan el valor de emergía más significativo de dicha fase con $2,46E+19$ seJ/año (Figura 3.5), además con un porcentaje de 43,73 % se encuentran los recursos renovables de la naturaleza, debido al alto valor energético de $5,3029E+19$ seJ/año del aire, esto ocurre debido a la gran cantidad de aire utilizado por el bloque de cogeneración en la industria azucarera.

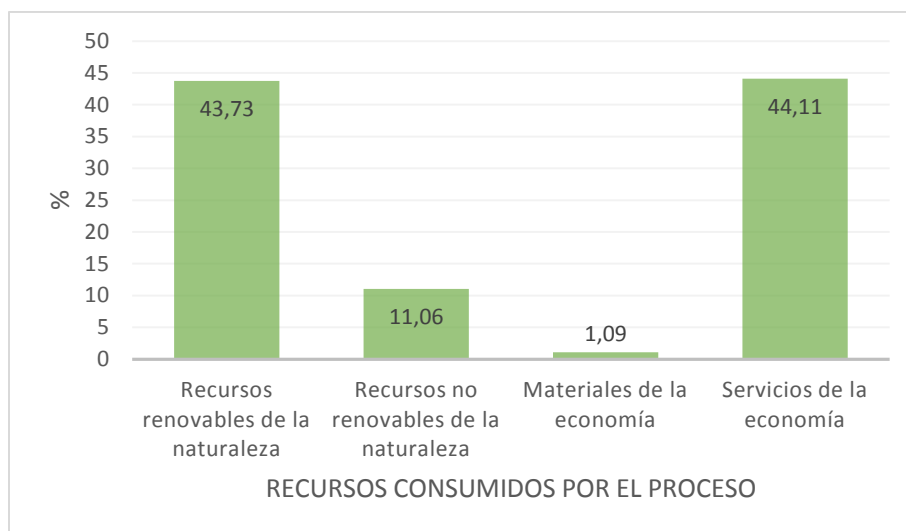


Figura 3.4. Proporción de la energía total por categoría en la Fase Industrial. Fuente. Elaboración propia.

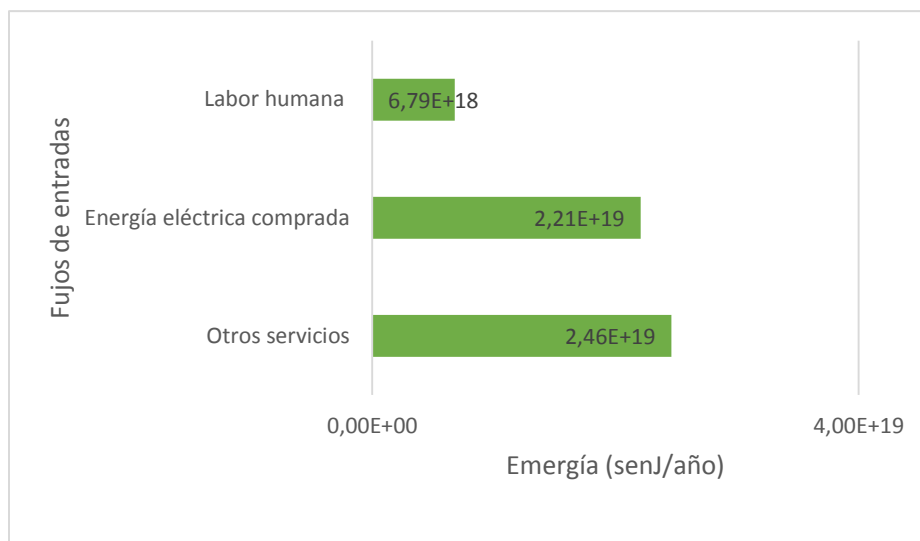


Figura 3.5. Consumo energético de Servicios no renovables en la Fase Industrial. Fuente. Elaboración propia

El principal flujo energético del proceso agro-industrial proviene de la economía ($1,1990\text{E}+20$ seJ/año) representando un 53,26 % de la energía total mientras que el aporte de la naturaleza ($8,3459\text{E}+19$ seJ/año) representa el 37,07 %. En la Figura 3.6 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.

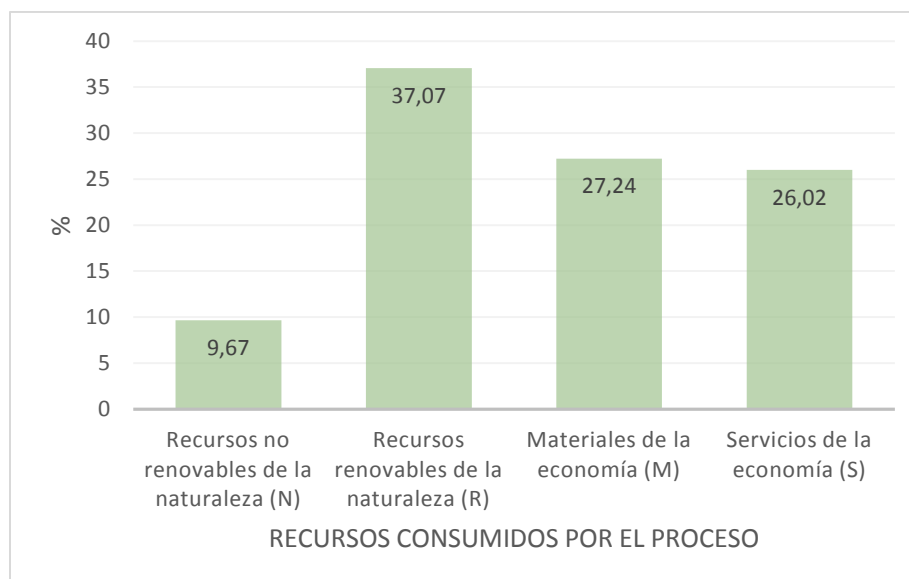


Figura 3.6. Proporción de la emergía total por categoría. Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, el balance emergético del sistema permite identificar, desde un punto de vista más amplio, en qué medida el sistema analizado necesita de los recursos renovables o no renovables de la naturaleza, de los materiales de la economía o de servicios pagados. En este sentido y como se comprobó en la Figura 3.6, aunque el sistema es capaz de aprovechar los recursos naturales tanto renovables como no renovables requiere una retroalimentación de la economía, destacándose el uso intensivo de fertilizantes nitrogenados.

Sustentando el 37,07 % de la producción, los recursos renovables de la naturaleza tienen un papel protagónico en el proceso cañero estudiado. Los materiales de la economía al sistema, respaldan el 27,24 % de la actividad productiva. Esta situación influye positivamente en el proceso, por el tipo de actividad que desarrolla, se basa en insumos más naturales, orgánicos y económicos.

3.1.5 Resultados del cálculo y análisis de los indicadores emergéticos

Transformidad y emergía específica:

Los productos obtenidos y sus unidades de valor emergético (UEV) se pueden ver en la Tabla 3.6. 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 emergías 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 3.6. Transformidades y emergías específicas de los productos del proceso. Fuente. Elaboración propia.

Producto	Producción	Transformidad (seJ/J)	Emergía 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 emergía (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 lógico preferencial la producción de electricidad en la fábrica como un elemento imprescindible para lograr mayor eficiencia y sostenibilidad.

En la Tabla 3.7 se muestran los indicadores emergéticos del proceso.

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

Renovabilidad (% R):

Con la cuantificación de este índice se pudo conocer que el proceso de obtención de caña de azúcar analizado emplea el 37,07 % de emergía 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.

Índice de Rendimiento Emergético (EYR):

El cálculo de este índice provee una medida de la apropiación de los recursos locales por un proceso, aunque también puede ser interpretado como una contribución potencial a la economía. Para el caso de estudio 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.

Índice de carga ambiental (ELR):

Este índice permite comparar la cantidad de emergencia no renovable + comprada, con la cantidad de emergencia renovable. 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 de la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas” 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.

Índice de sostenibilidad (ESI):

Con este índice se obtiene una medida de la contribución de un producto a la economía por unidad de carga impuesta en el sistema local. Al calcular el índice de sostenibilidad para la actividad cañera desarrollada en las unidades productoras asociadas a la UEB “Ciudad Caracas”, 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.

Al analizar los resultados obtenidos con estudios emergéticos realizados al proceso de azúcar crudo en otra unidad productora, según Abreu (2017) para la Fase Agrícola estimó un rendimiento cañero de 43,2 t/ha, como resultado emergético obtuvo un porcentaje de renovabilidad de 14,31 % y el mayor flujo emergético estaba representado por los materiales de la economía con un 53 %, donde el mayor consumo corresponde a los

fertilizantes. Teniendo en cuenta estos resultados podemos afirmar que el sistema agrícola en estudio posee un mayor rendimiento cañero igual a 49,36 t/ha, donde los materiales de la economía representan el 57,77 % y el consumo de fertilizantes es también el flujo emergético más representativo, a pesar de en el sistema en estudio se haya abordado un área mayor y en consecuencia se hace necesario la implementación de un mayor consumo de fertilizantes, cabe resaltar que las características de los suelos no son las mismas en todo territorio factor decisivo para la cosecha, esto está estrechamente vinculado con los diferentes tratamientos para obtener un mayor rendimiento. El sistema en estudio es más factible al poseer un 37,07 % de renovabilidad, mientras que con un 14,31 % renovabilidad, esta situación pone en total desaprovecho a los bienes que pudiesen obtenerse del medio ambiente circundante, utilizando en demasía los recursos económicos, escenarios que a largo plazo terminará afectando la estabilidad económica del proceso.

Según Valdés (2017) para la Fase Industrial de otro central objeto de estudio, estimó una renovabilidad del 36,55 %, el mayor flujo emergético estaba representado por los materiales de la economía con un 49,04 %, donde el mayor consumo corresponde a la labor humana. En el sistema industrial en estudio, se obtuvo como resultado del balance emergético que el menor porcentaje de las cuatro categorías analizadas les corresponde a los materiales de la economía con 1,09 %, esta desigual proporción viene dada a que el sistema industrial estudiado no necesita de grandes cantidades de productos químicos, para garantizar la calidad de sus productos y co-productos, además de utilizar mayores recursos de la naturaleza repercutiendo de manera positiva en la estabilidad económica del proceso.

3.2 Recomendación de alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad

Teniendo en cuenta lo anterior se recomienda buscar alternativas que estén encaminadas a resolver los principales problemas que afectaron estos resultados, estas alternativas son sólo recomendaciones que deberán ser evaluadas, de preferencia por la metodología emergética. En este sentido, seguidamente se presentan las opciones recomendadas.

- Disminuir el consumo de los fertilizantes químicos tradicionales considerando el empleo de otros de origen natural y más económicos.

El alto importe económico que supone la compra de fertilizantes químicos y su elevado consumo en el cultivo de la caña de azúcar de las unidades productoras estudiadas, son

factores que afectaron negativamente los resultados de la evaluación del proceso. El costo monetario producto de la adquisición de los fertilizantes se considera como parte de los servicios no renovables importados de la economía; mientras que el consumo se contabiliza como un material de la economía dependiendo del tipo de fertilizante empleado (nitrógeno, fósforo o potasio). Si se considera el empleo en mayor medida de fertilizantes de origen natural y de ser posible aprovechando los residuos de los procesos agro-industriales azucareros, se disminuiría el importe económico dedicado a la compra de fertilizantes tradicionales y el nivel de consumo de estos últimos.

Los índices emergéticos también pudieran verse influenciados positivamente con esta alternativa. Como muestra de ello, aumentaría la renovabilidad del proceso si se considerara exclusivamente productos provenientes de la naturaleza y que no requieran un importe económico para su adquisición u obtención. Asimismo, disminuiría el índice de inversión emergética del proceso dada la menor cantidad de recursos importados al sistema y el posible aumento de los recursos renovables, lo que lógicamente conduciría a un menor costo económico del proceso y fomentaría una propuesta más competitiva y posible a prosperar en el mercado. Por otro lado, una disminución de los recursos provenientes de la economía, principalmente de los fertilizantes, aumentaría el índice de rendimiento emergético lo que favorecería positivamente el proceso pues, cuanto mayor sea este índice, mayor es la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema. Otro índice de suma importancia y que cambiaría para mejor es la carga ambiental. Una disminución de la emergía comprada y un posible aumento de la emergía renovable, disminuirán la carga ambiental generada por el sistema sobre el medio ambiente. Finalmente, el índice de sostenibilidad emergética aumentaría con la variación predicha para los dos últimos índices mencionados, otorgándole mayor sostenibilidad al sistema en la medida que se logre disminuir el consumo de los fertilizantes químicos tradicionales considerando el empleo de otros tipos de origen natural y más económicos. Sin embargo, es necesario evaluar esta alternativa pues habría que valorar en qué medida influye este cambio de fertilizantes en el rendimiento del campo o la cantidad de sacarosa presente en la caña.

- Aumento de la producción de electricidad

Mayor producción de electricidad pudiera lograrse haciendo inversiones para lograr una explotación más efectiva del bagazo usando turbocompresores de contrapresión y entregando a la red nacional el excedente de electricidad. Además, aprovechando los residuos agrícolas (RAC) como fuente energética mezclado con bagazo al mismo tiempo del montaje de un ciclo de condensación (CEST) que mejoraría considerablemente la entrega de energía (100 kWh/t caña) y permitiría la flexibilidad del proceso (Valdés, 2017).

No obstante, la producción de electricidad mediante la combustión del bagazo es mucho menos dañina ambientalmente como se observa en la razón de carga ambiental (ELR) e incluso mucho menor para las plantas a partir de fuentes renovables. Esto evidencia que hay que evaluar estas tecnologías debido a que estos recursos se obtienen localmente mientras que el petróleo es un recurso importado y sus precios dependen del escenario político internacional.

Además, si se considera la diferencia de las capacidades instaladas y la cantidad de energía entregada se reafirma las potencialidades del recurso de la biomasa. Asumiendo que la demanda eléctrica específica de la fábrica permaneciera igual el ahorro de petróleo ascendería lo que sí resulta significativo.

Conclusiones

CONCLUSIONES

1. La tendencia contemporánea indica que, dentro de las fuentes de energía renovables, el uso de la biomasa cañera será la que experimente el mayor crecimiento en los próximos años en Cuba destacándose dentro de sus diversas aplicaciones la cogeneración de electricidad mediante su combustión.
2. Hasta la actualidad se han desarrollado diversos indicadores para la valoración de los potenciales impactos ambientales de los sistemas, sin embargo, no existe un consenso sobre la superioridad de ninguno de estos. La mayoría de los estudios previos en el sector azucarero se corresponden con el análisis de ciclo de vida sin embargo con mayor frecuencia se está utilizando el análisis emergético dado que permite abordar la evaluación abandonando la tradicional postura antropocéntrica.
3. Las transformidades calculadas para los principales productos del sistema analizado fueron $1,6501 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$ para el azúcar crudo y $3,4634\text{E}+06 \text{ seJ/J}$ para la electricidad lo que demuestra que desde la perspectiva del análisis emergético en la UEB “Ciudad Caracas” es más eficiente la cogeneración de electricidad que la producción de azúcar. El índice de sostenibilidad emergética (ESI) calculado fue 1,11 indicando que el sistema presenta una contribución moderada a la economía durante periodos de corto y mediano plazo.
4. Las principales alternativas identificadas para solucionar los problemas detectados en la valoración del sistema fueron: disminuir el consumo de los fertilizantes químicos tradicionales considerando el empleo de otros de origen natural y valorar la adquisición de tecnologías más eficientes para aumentar la producción de electricidad.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Complementar el estudio realizado con otras metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el objetivo de obtener un enfoque más adecuado sobre la evaluación de la sostenibilidad del sistema en estudio.
2. Socializar los resultados aquí obtenidos, para propiciar el desarrollo de este tipo de investigación en la industria azucarera cubana.
3. Valorar el impacto sobre la sostenibilidad de las alternativas recomendadas en la investigación.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Manuales sobre energía renovable/BIOMASA. (2002). San José: Costa Rica.
- Abreu, C. (2017). Evaluación emergética del proceso agrícola para la obtención de caña de azúcar en la UEB "14 de Julio". (Tesis de Diploma), Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos.
- Álvarez, R. (2016). Potencialidades de mejoras del esquema térmico del central azucarero "14 de Julio". (Tesis de Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos, Cienfuegos.
- Bastianoni, S., Campbell, D. E., Ridolfi, R. & Pulselli, F. M. (2009). "The solar transformity of petroleum fuels," *ScienceDirect*, vol. 220, pp. 40-50.
- Bérriz Pérez, L. (2015). Esquemas y esquemas. Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar24/HTML/articulo04.htm>
- Bienes, R. (2001). Evolución del coeficiente de escorrentía en campos agrícolas del centro de España con diferentes usos del suelo. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>
- Brandt Williams, S. (2001). *Emergy of Florida Agriculture*. Florida, Estados Unidos: Universidad de Florida.
- Bravo Amarante, E., López Bastida, E., & Romero Romero, O. (2018). La energía como indicador de economía ecológica para medir sustentabilidad. *Universidad y Sociedad*, 10(5), 78-84. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Bravo Hidalgo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Revista Centro Azúcar*, 42. <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu>
- Brown, M., T. & Ulgiati, S. (2004). *Emergy Analysis and Environmental Accounting*. In C. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (329-354). Oxford (United Kingdom): Elsevier.
- Brown, M., T. & Ulgiati, S. (2002). "Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems," *Journal of cleaner production*, 10(4), 321-334.
- Buenfil, A. (2001). "Emergy evaluation of water," Graduate school of the University of Florida, University of Florida, Gainesville.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics* (9 ed.). United States of America: McGraw-Hill Education

- Cuadra, D., Véliz, D., Sandoval, J., & Castro, P. J. (2017). Aportes a la economía ecológica: Una revisión de estudios latinoamericanos sobre subjetividades medio ambientales *Psicoperspectivas Individuo y Sociedad*, 16, 156-169.
- Curbelo, A. (2018). Potencial de biomasa forestal y agro-residuos. C. D. d. E. R. M. Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), Cuba. **No. 09.**
- De Lucas, A. I., & Del Peso, C. (2012). Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad. In Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (Ed.).
- Douglas, B. (2018). *Renewables 2017 Global Status Report*. Paper presented at the Cuba Sustainable Energy Forum, La Habana.
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2011). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas *Información Tecnológica*, 23(1), 163-176.
- Francisco, J. A., & E. Cerdá. (2012). "Las energías renovables en el ámbito internacional."
- Gala, A. B., Raugei, M., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2015). Dealing with waste products and flows in life cycle assessment and emergy accounting: Methodological overview and synergies. *Ecological Modelling*.
- Gálvez, C. (2016). Análisis emergético para la reutilización de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Clara-Lima, Perú. *Ingenium*, 1, 9-15.
- GEBC (Grupo Estatal de Biomasa Cañera), (2016). "Incremento de generación con biomasa cañera" en Documento interno de AZCUBA. Mayo 2016.
- Giannetti, B. F., Prevez, L., Agostinho, F., & Almeida, C. (2016). "Greening A Cuban Local Mango Supply Chain: Sustainability Options and Management Strategies," *Journal of Environmental Accounting and Management*, 4(3), 251-266.
- Griffa, B., Marcó, L., & Goldstein, E. (2017). Producir electricidad con biomasa: Beneficios, experiencias y actualidad en Argentina. *Revista de la facultad de ciencias económicas*. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.30972/rfce.0192858>
- Hau, J. L., & Bakshi, B. R. (2004). Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 178, 215-225. Recuperado de <https://www.academia.edu/2613861/>
- Hugo, H. V. (2016). Oportunidades y desafíos para el aprovechamiento sostenible del potencial energético de la biomasa. C. E. p. A. L. y. e. C. (CEPAL).
- Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering* (G. Jenkins, Trans. 3 ed.): Elsevier.

- Incropera, F. P. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Vol. 3). La Habana, Cuba: Félix Varela.
- Izursa, J. L. (2011). Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*, 46, 71-76.
- Jarméus, C. (2013). "Emergy Analysis of Biodiesel and Biogas Production from Baltic Sea Macro Algae," Master, Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (2006). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements (Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70). New York: Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers.
- Jímenez, B. R., et al. (2018). "Evaluación preliminar del potencial energético de diferentes biomásas en la provincia de Cienfuegos." *Revista Centro Azúcar* 45.
- Jonge, S. D. (2017). Sustainable energy in S. E. Production (Ed.).
- Lara, J. (2012). Huella ecológica, datos y rostros. México.
- Leiva, J., Rodríguez, I.L, & Martínez, P. (2012). Cálculo de la huella ecológica en universidades cubanas. Caso de estudio: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
- Lomas, P., Di Donato, M., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Ecosistemas*, 16(3), 37-45. Recuperado de <https://core.ac.uk/>
- Lomas, P. (2009). Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio. (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma de Madrid, España. Recuperado de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/4124/28192_lomas_huertas_pedro.pdf;sequence=1#page=74
- López, E. M. (2013) Los indicadores ambientales como herramientas de la economía.
- López , E. J., García, Y., & Valdés, A. (2018). Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante el análisis emergético. *Centro Azúcar*, 45(2), 59-67.
- Mentado, C. (2017). Los incentivos económico-financieros por la generación y uso de las fuentes renovables de energía. Análisis de su marco jurídico en Cuba. Facultad de Ciencias, Santa Clara, Marta Abreu de Las Villas.

- MINEM (2018). Programa Energético Renovable en Cuba. MINEM.
- Mondéjar, M. V., Viñoles, R., Bastante, M. J., Collado, D., & Capuz, S. (2011). La huella de carbono y su utilización en las instituciones universitarias Universidad Politécnica de Valencia: Salvador.
- Morán, C. (2017). ¿Qué es la economía ecológica? Madrid. España.
- Moring, V. (2006). Termodinámica (Vol. 2). La Habana, Cuba: Félix Varela.
- NASA. (2016). Albedo (1 month) | NASA. Recuperado de <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84499>
- NASA. (2016). Glossary: Albedo. Recuperado de <http://neo.jpl.nasa.gov/glossary/albedo.html>
- NC-ISO 14 040 *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Oficina Nacional de Normalización (2009).
- Nogueira López, A. (2019). La huella ecológica. El establecimiento de indicadores ambientales y su significación para el Derecho. *Revista Catalana de dret ambiental*, 10, 1-25.
- Odum, H. T. (1996). Environmental Accounting (Emergy and Environmental Decision Making). New York, E. U.: John Wiley & Sons Inc.
- Odum, H. T. (2000). "Emergy of Global Processes," in *Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*, vol. 2Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy.
- Odum, H. T., Brown, M. T. & Brandt-Williams, S. (2000). "Introduction and Global Budget," in *Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*, vol. 1Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy.
- ONEI (2018). Anuario Estadístico de Cuba 2018. Medio Ambiente ONEI.
- PCC (2017). Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021.
- Pérez Martínez, D. M., Contreras Moya, A. M., & Pérez, F. (2010). Análisis de Ciclo de Vida en la empresa Panchito Gómez Toro. In C. Azúcar (Ed.). Villa Clara: Cuba.
- Pimentel, D. C., Harvey, P., & Resosudarmo, K. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 117-121.

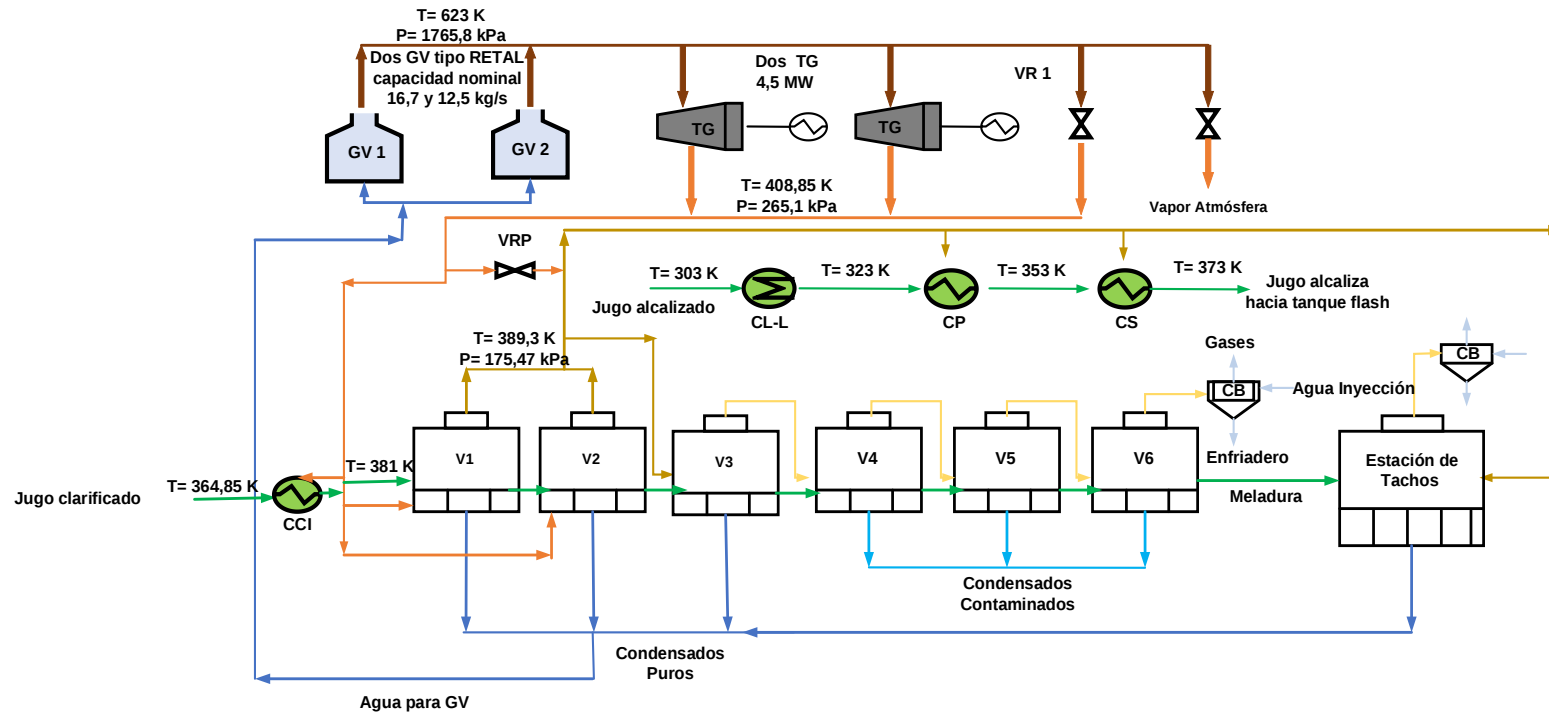
- Rein, P. (2012). Ingeniería de la caña de azúcar. Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens
- Rico, J. (2007). Energía de la biomasa.
- Robles, C. R., Omar (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. ESPACIOS. **39**: 10.
- Rosa, E., et al. (2010). Utilización del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el estudio de impacto ambiental de los depuradores de gases de combustión. Villa Clara, Cuba.
- Rosabal Vega, J. M., & Valle Matos, M. (2010). Hidrodinámica y separaciones mecánicas (Vol. I). La Habana, Cuba: Félix Varela.
- Rubio, M. A., & Rubio, A. (2019). Programa cubano máximo aprovechamiento biomasa cañera para generación de electricidad. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas: Villa Clara.
- Saldini, F., et al. (2016). Sustainability assessment of selected biowastes as feedstocks for biofuel and biomaterial production by emergy evaluation in five African countries. Biomass and Bioenergy, 85, 100108. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/>
- Sweeney, S., Cohen, M. J., King, D. & Brown, M. T. (2007). "Creation of a Global Emergy Database for Standardized National Emergy Synthesis," in *Proceedings from the Fourth Biennial Emergy Conference*, Gainesville (Florida), vol. 23: Center for Environmental Policy.
- Toro, J., & León, N. (2012). *El análisis de ciclo de vida (ACV) en el desarrollo sostenible: Propuesta metodológica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos* Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Tutoriales al Día - Ingeniería Civil. (2013). Todo lo Que Necesitas Saber Sobre el Coeficiente de Escorrentía. Recuperado de <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/>
- Ulgati, S., Brown, M. T., Bastianoni, S., & Marchettini, N. (1995). Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. Ecological Engineering, 5, 519-531.
- Valdés López, A., López Bastida, E. J., & Alonso Aguilera, A. (2019). Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. Universidad y Sociedad, 11(4), 424-435. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Vezzoli, C. (2018). Design for Environmental Sustainability: Life Cycle Design of Products (2 ed.). London: SpringerVerlag.
- Victoria, H. (2009). El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.

Vignote, S. (2016). La biomasa: Importancia, tipos y características y formas de preparación. Madrid: España.

Zhang, X., Deng, S., Jiang, W., Zhang, Y., Peng, H., Li, L., Li, Y. (2010). Emergy evaluation of the sustainability of two industrial systems based on wastes exchanges. *Resources, Conservation and Recycling*, (55), 182-195.

Anexos

ANEXO 1. Diagrama de flujo de proceso (DFP) de la UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas”. Fuente. Elaboración propia.



Leyenda:

- GV-Generadores de vapor
- TG- Turbogenerador
- CL-L- Calentador líquido -líquido
- CP- Calentador primario
- CS-Calentador secundario
- V-Vasos evaporadores
- VR1-Válvula reductora de alta
- VRP-Válvula reductora de proceso
- CCI-Calentador jugo clarificado
- CB-Condensador barométrico

ANEXO 2. Reporte de indicadores y corrientes del software TermoAzúcar.

Indicadores globales		
Nombre	Valor	Unidad
Bagazo sobrante % disponible	21,73	%
Consumo vapor de la fábrica % flujo másico caña	51,89	%
Vapor total expulsado a la Atmósfera % flujo másico caña	11,29	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % Demanda escape proceso	8,9	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % flujo másico de caña	4,62	%
Vapor escape reductora proceso 1 % vapor extracción simple efecto o efecto 1 múltiple	0	%
Vapor escape reductora proceso 1 % flujo másico caña	0	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 2 % Demanda escape proceso	0	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 2 % flujo másico de caña	0	%
Vapor escape reductora proceso 2 % vapor extracción simple efecto o efecto 1 múltiple	0	%
Vapor escape reductora proceso 2 % flujo másico caña	0	%
Producción Eléctrica Específica de la Fábrica	53,65	kW-h/t caña
Demanda Eléctrica Específica de la Fábrica	11,92	kW.h/t caña
Electricidad vendida al SEN	41,73	kW-h/t caña
Déficit de condensados puros % flujo másico caña	0	%
Sobrante de Condensados Puros % flujo másico caña	2,28	%
Sobrante de Condensados Puros % Consumo Vapor de la Fábrica	4,39	%
Total de condensados contaminados % flujo másico caña	39,35	%
Sobrante de Condensados Contaminados % flujo másico caña	0	%
Déficit de condensados contaminados % flujo másico caña	2,95	%
Rendimiento industrial	16,19	%
Porcentaje explotación total capacidad nominal instalada	83,02	%
Eficiencia de los motores primarios en base a biomasa	16,33	%
Eficiencia térmica en base a biomasa	43,43	%
Eficiencia total de cogeneración en base a biomasa	59,76	%
Eficiencia de los motores primarios en base a vapor	25,78	%
Eficiencia térmica en base a vapor	68,56	%
Eficiencia total de cogeneración en base a vapor	94,34	%
Relación calor potencia	2,66	
Consumo de vapor de escape en el proceso % flujo másico caña	51,89	%
Porcentaje explotación capacidad nominal en Caldera I	83,98	%
Porcentaje explotación capacidad nominal en Caldera II	81,72	%

Indicadores por área		
Nombre	Valor	Unidad
Consumo de vapor de escape en los evaporadores % flujo másico caña	31,94	%
Consumo de vapor en tachos % flujo másico caña	14,86	%
Consumo de vapor en tachos % peso SST en meladura	98,8	%
Consumo de vapor escape en proceso de crudo % flujo másico SST en jugo claro	345,08	%
Economía del área de evaporación	2,54	adimensional
Economía del múltiple efecto	9,94	adimensional
Tasa de evaporación del múltiple efecto	23,63	kg/h.m ²
Pérdidas calor evaporación al Condensador barométrico del múltiple % Demanda escape del proceso	122,95	%
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de Casa de calderas	19,21	%

Indicadores relacionados con datos de entrada al simulador		
Nombre	Valor	Unidad
Bagazo disponible % flujo másico caña	29,8	%
Humedad en el bagazo	47,13	%
Temperatura inicial del jugo alcalizado o mezclado + filtrado	375,85	K
Temperatura del jugo alcalizado hacia el tanque flash	375,85	K
Temperatura del jugo claro	364,85	K
Brix del jugo claro	14,32	%
Brix de la meladura	63,15	%
Agua tecnológica en tachos % flujo másico caña	7	%
Eficiencia Bruta en Caldera I	75,00	%
Eficiencia Bruta en Caldera II	75,00	%
Factor de pérdidas de calor en 41	1,05	adimensional

Parámetro	Corriente identificada
Bagazo sobrante % disponible	
Bagazo sobrante	c8(Bagazo sobrante)
Bagazo disponible	c1(Bagazo Disponible)
Consumo vapor de la fábrica % flujo másico caña	
Consumo vapor de la fábrica	c9(Consumo de vapor de la fábrica)
Vapor total expulsado a la Atmósfera % flujo másico caña	
Vapor expulsado a la atmósfera	c15(Vapor expulsado atmósfera 1) c29(vapor expulsado atmósfera 2)
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % Demanda escape proceso	
Vapor directo por reductora 1	c16(Vapor reductora 1)
Consumo total de vapor en el proceso	c18(Vapor total usado en el proceso)
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % flujo másico de caña	
Vapor directo por reductora 1	c16(Vapor reductora 1)
Vapor escape reductora proceso 1 % vapor extracción simple efecto o efecto 1 múltiple	
Vapor por reductora de proceso 1	c30(vapor por reductora de proceso)
Vapor de extracción	c28(vapor total de extracción)
Vapor escape reductora proceso 1 % flujo másico caña	
Vapor por reductora de proceso 1	c30(vapor por reductora de proceso)
Vapor directo a escape por válvula reductora 2 % Demanda escape proceso	

Vapor directo por reductora 2	c30(vapor por reductora de proceso)
Consumo total de vapor en el proceso	c18(Vapor total usado en el proceso)
Vapor directo a escape por válvula reductora 2 % flujo másico de caña	
Vapor directo por reductora 2	c30(vapor por reductora de proceso)
Vapor escape reductora proceso 2 % vapor extracción simple efecto o efecto 1 múltiple	
Vapor por reductora de proceso 2	c30(vapor por reductora de proceso)
Vapor de extracción	c58(Vapor total de extracción)
Vapor escape reductora proceso 2 % flujo másico caña	
Vapor por reductora de proceso 2	c30(vapor por reductora de proceso)
Déficit de condensados puros % flujo másico caña	
Déficit de condensados puros	c59(Déficit de Condensados puros)
Sobrante de Condensados Puros % flujo másico caña	
Sobrante total de condensados puros	c66(Sobrante de condensados puros)
Sobrante de Condensados Puros % Consumo Vapor de la Fábrica	
Sobrante total de condensados puros	c66(Sobrante de condensados puros)
Consumo vapor de la fábrica	c9(Consumo de vapor de la fábrica)
Total de condensados contaminados % flujo másico caña	
Total de condensados contaminados	()
Sobrante de Condensados Contaminados % flujo másico caña	
Sobrante de condensados contaminados	c78(Sobrante de condensados contaminados)
Déficit de condensados contaminados % flujo másico caña	
Déficit de condensados contaminados	c79(Déficit de condensados contaminados)
Rendimiento industrial	
Azúcar producida	c47(Azúcar producida)
Porcentaje explotación total capacidad nominal instalada	
Consumo vapor de la fábrica	c9(Consumo de vapor de la fábrica)
Eficiencia térmica en base a biomasa	
Total de escape	c14(total de vapor de escape)
Eficiencia total de cogeneración en base a biomasa	
Total de escape	c14(total de vapor de escape)
Eficiencia de los motores primarios en base a vapor	
Total vapor producido	c10(Vapor usado por Turbo I) c11(Vapor usado por Turbo II)
Eficiencia térmica en base a vapor	
Total vapor producido	c10(Vapor usado por Turbo I) c11(Vapor usado por Turbo II)
Total de escape	c14(total de vapor de escape)
Eficiencia total de cogeneración en base a vapor	
Total vapor producido	c10(Vapor usado por Turbo I) c11(Vapor usado por Turbo II)
Total de escape	c14(total de vapor de escape)
Relación calor potencia	
Total de escape	c14(total de vapor de escape)
Consumo de vapor de escape en el proceso % flujo másico caña	
Consumo total de vapor en el proceso	c18(Vapor total usado en el proceso)
Consumo de vapor de escape en los evaporadores % flujo másico caña	
Consumo vapor en evaporadores	c54(vapor total consumido en evaporadores)
Consumo de vapor en tachos % flujo másico caña	
Consumo vapor en tachos	c45(Vapor consumido Tacho)
Consumo de vapor en tachos % peso SST en meladura	
Consumo vapor en tachos	c45(Vapor consumido Tacho)

Meladura	c39(meladura)
Consumo de vapor escape en proceso de crudo % flujo másico SST en jugo claro	
Consumo total vapor en el proceso de crudo	c18(Vapor total usado en el proceso)
Jugo claro	c70(Jugo claro)
Economía del área de evaporación	
Evaporaciones	c34(Evaporación Vaso 4) c35(Evaporación Vaso 3) c36(Evaporación Vaso 5) c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico) c26(Evaporación Vaso1) c27(Evaporación Vaso 2)
Consumo vapor en evaporadores	c54(vapor total consumido en evaporadores)
Economía del múltiple efecto	
Evaporaciones	c34(Evaporación Vaso 4) c35(Evaporación Vaso 3) c36(Evaporación Vaso 5) c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico) c26(Evaporación Vaso1) c27(Evaporación Vaso 2)
Consumo Vapor en el múltiple efecto	()
Tasa de evaporación del múltiple efecto	
Evaporaciones	c34(Evaporación Vaso 4) c35(Evaporación Vaso 3) c36(Evaporación Vaso 5) c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico) c26(Evaporación Vaso1) c27(Evaporación Vaso 2)
Pérdidas calor evaporación al Condensador barométrico del múltiple % Demanda escape del proceso	
Evaporación último efecto del múltiple	c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico)
Consumo vapor en múltiple efecto	()
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de Casa de calderas	
Evaporaciones a condensadores barométricos	c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico)
Consumo total de vapor en el proceso de crudo	c18(Vapor total usado en el proceso)
Bagazo disponible % flujo másico caña	
Bagazo disponible	c1(Bagazo Disponible)
Humedad en el bagazo	
Bagazo disponible	c1(Bagazo Disponible)
Temperatura inicial del jugo alcalizado o mezclado + filtrado	
Jugo alcalizado o mezclado + filtrado	c63(Jugo Alcalizado hacia tanque flash)
Temperatura del jugo alcalizado hacia el tanque flash	
Jugo alcalizado hacia tanque flash	c63(Jugo Alcalizado hacia tanque flash)
Temperatura del jugo claro	
Jugo claro	c70(Jugo claro)
Brix del jugo claro	
Jugo claro	c70(Jugo claro)
Brix de la meladura	
Meladura	c39(meladura)
Agua tecnológica en tachos % flujo másico caña	
Agua tecnológica en tachos	c44(Agua tecnológica tacho)

ANEXO 3. Tabla emergética para el sistema agro-industrial de la UEB Central Azucarero

FASE AGRÍCOLA								
Nº	Insumo	Flujo	Unidad	Transformidad	Unidad	Emergía	Unidad	%Total
Recursos renovables de la naturaleza						3.0430E+19	seJ/año	13.52%
1	Radiación Solar	5.2936E+17	J/año	1	seJ/J	5.2936E+17	seJ/año	0.24%
2	Precipitaciones	4.7742E+14	J/año	3.02E+04	seJ/J	1.444E+19	seJ/año	6.41%
3	Evapotranspiración	5.9704E+14	J/año	2.59E+04	seJ/J	1.546E+19	seJ/año	6.87%
Recursos no renovables de la naturaleza						8.3462E+18	seJ/año	3.71%
4	Pérdida del suelo	6.7308E+13	J/año	1.24E+05	seJ/J	8.3462E+18	seJ/año	3.71%
Materiales de la economía						6.5092E+19	seJ/año	28.91%
5	Diésel	1.3866E+09	g/año	2.83E+09	seJ/g	3.9240E+18	seJ/año	1.74%
6	Gasolina	6.7236E+06	g/año	2.92E+09	seJ/g	1.9633E+16	seJ/año	0.01%
7	Maquinaria Agrícola	5.54E+04	g/año	1.12E+10	seJ/g	6.20E+14	seJ/año	0.00%
8	Herbicidas, fungicidas e insecticidas	2.7461E+07	g/año	2.48E+10	seJ/g	6.8103E+17	seJ/año	0.30%
9	Potasio	3.9262E+08	g/año	3.11E+09	seJ/g	1.2203E+18	seJ/año	0.54%
10	Fósforo	3.4930E+08	g/año	3.70E+10	seJ/g	1.2924E+19	seJ/año	5.74%
11	Nitrógeno	1.0181E+09	g/año	4.05E+10	seJ/g	4.1233E+19	seJ/año	18.32%
12	Labor humana	1.2949E+12	J/año	3.93E+06	seJ/J	5.08891E+18	seJ/año	2.26%
FASE INDUSTRIAL								
Recursos renovables de la naturaleza						5.3029E+19	seJ/año	23.56%
13	Aire	5.40015E+16	J/año	9.82E+02	seJ/J	5.30294E+19	seJ/año	23.56%
Recursos no renovables de la naturaleza						1.3416E+19	seJ/año	5.96%
14	Aire	1.3585E+16	J/año	9.82E+02	seJ/J	1.3340E+19	seJ/año	5.93%
15	Agua	1.39598E+11	g/año	5.4264E+05	seJ/g	7.57516E+16	seJ/año	0.03%
Materiales de la economía						1.3270E+18	seJ/año	0.59%
16	Diésel	32618080.6	g/año	2.83E+09	seJ/g	9.2309E+16	seJ/año	0.04%
17	Gasolina	6253650	g/año	2.9200E+09	seJ/g	1.82607E+16	seJ/año	0.01%
18	Grasas y aceites lubricantes	49474540	g/año	6.60E+04	seJ/g	3.26532E+12	seJ/año	0.00%
19	Ácido clorhídrico	1.3890E+07	g/año	6.12E+09	seJ/g	8.4940E+16	seJ/año	0.04%
20	Sosa cáustica	6.1620E+06	g/año	3.19E+09	seJ/g	1.9669E+16	seJ/año	0.01%
21	Fosfato trisódico	4.6150E+07	g/año	9.35E+09	seJ/g	4.32E+17	seJ/año	0.19%
22	Otros productos químicos	1.79E+09	g/año	3.80E+08	seJ/g	6.80E+17	seJ/año	0.30%
Servicios de la economía						5.35E+19	seJ/año	23.76%
23	Servicios no renovables	5.35E+06	\$/año	4.60E+12	seJ/\$	2.46E+19	seJ/año	10.93%
24	Energía eléctrica comprada	6.49E+13	J/año	3.40E+05	seJ/J	2.21E+19	seJ/año	9.81%
25	Labor humana	1.72652E+12	J/año	3.93E+06	seJ/J	6.7852E+18	seJ/año	3.01%
EMERGÍA DE FUENTES RENOVABLES [R]						8.3459E+19	seJ/año	37.07%
EMERGÍA DE FUENTES NO RENOVABLES [N]						2.1762E+19	seJ/año	9.67%
EMERGÍA IMPORTADA DE LA ECONOMÍA [F]						1.1990E+20	seJ/año	53.26%
EMERGÍA TOTAL						2.2512E+20	seJ/año	

“Ciudad Caracas”. Fuente. Elaboración propia.