

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante indicadores emergéticos. Caso de estudio UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.

AUTOR: Alejandro Valdés López

TUTORES: MSc. Yolanda García Martínez
Dr.C Eduardo J. López Bastida

Cienfuegos 2017

DECLARATORIA DE AUTORIDAD

Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado *Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante indicadores emergéticos. Caso de estudio UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”* 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 _____.

Autor: Alejandro Valdés López

Tutora: MSc. Yolanda García Martínez

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

Nature is a language and every new fact one learns is a new word; but it is not a language taken to pieces and dead in the dictionary, but the language put together into a most significant and universal sense. I wish to learn this language, not that I may know a new grammar, but that I may read the great book that is written in that tongue.

Ralph Waldo Emerson

DEDICATORIA

A Dios, por darme el aliento para continuar, no importa la complejidad de la tarea.

A la madre naturaleza, cuya magnífica belleza se ve amenazada por el egoísmo y la arrogancia de los hombres.

A mi familia, especialmente a mi mamá y abuelos, por su apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí; nada de esto hubiese sido posible sin ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, por su amistad y ser guías certeros durante el proceso de investigación.

A los trabajadores de la “UEB 14 de Julio”, especialmente al Ing. Juan Carlos Díaz Fach por sus incansables esfuerzos.

A los profesores: Ing. Reínier Jiménez Borges y MSc. Edelvy Bravo Amarante, por sus consejos y ayuda.

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 por existir.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTUDIOS DOCUMENTALES.	6
1.1 Desarrollo sostenible.....	6
1.2 Industria azucarera cubana.....	9
1.2.1 Etapas del proceso de producción de azúcar crudo.....	11
1.2.2 Sostenibilidad en la industria azucarera	18
1.3 Energía y Exergía.....	20
1.3.1 Energía y primera ley de la termodinámica	20
1.3.2 Exergía y segunda ley de la termodinámica.....	22
1.4 Emergía.....	24
1.4.1 Definición de eMergía.....	24
1.4.2 Unidades de valor emergético. Transformidad	26
1.4.3 Simbología emergética.....	28
1.4.4 Álgebra emergética	30
1.4.5 Indicadores emergéticos.....	32
1.4.6 Principales críticas y aciertos de la metodología emergética.....	34
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	38
2.1 Caracterización del objeto de estudio	38
2.1.1 Localización geográfica.....	38
2.1.2 Características del esquema tecnológico	39
2.2 Metodología de la investigación	40
2.2.1 Límites espacio-temporales del sistema.....	42
2.2.2 Modelación emergética	42
2.2.3 Balance energético del sistema	45
2.2.4 Construcción de la tabla emergética.....	50
2.2.5 Cálculo y análisis de los indicadores emergéticos	54
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	60
3.1 Límites espacio-temporales del estudio	60

3.2 Modelación del sistema	61
3.2 Resultados del balance energético	62
3.3 Resultados de la tabla emergética	67
3.4 Resultados del cálculo y análisis de los indicadores emergéticos	70
3.5 Recomendación de alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad	73
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	88
Anexo 1. Biografía de Howard Thomas Odum.	88
Anexo 2. Cambios en la energía y transformidad para un sistema.	89
Anexo 3. Símbolos más comunes para conformar un diagrama emergético.	90
Anexo 4. <i>Emergy sustainability indicators</i>	91
Anexo 5. Indicadores emergéticos.	92
Anexo 6. Mapa del proceso en la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.	93
Anexo 7. Reporte de zafra para el período 2014/2015.	94
Anexo 8. Reporte de indicadores y corrientes del software TermoAzúcar.	95

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 Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. Para ello se utilizó la Metodología Emergética desarrollada por el ecólogo norteamericano Howard T. Odum realizándole algunas adecuaciones. Se determinó que el 51,44 % de la emergía del proceso proviene de la economía y que el 48,56 % de los recursos naturales. El índice de sostenibilidad emergética (ESI) calculado fue 1,12 que indica que el proceso no es sostenible a largo plazo, pero sí contribuye moderadamente a la economía. La evaluación permitió conocer las transformidades de los principales productos de la fábrica siendo: $1,2328 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$ para el azúcar crudo y $1,2391 \text{ E}+07 \text{ seJ/J}$ para la electricidad. Se determinó además la emergía específica de otros co-productos importantes como son: $9,5501 \text{ E}+09 \text{ seJ/g}$ para el bagazo, $1,5957 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$ para la miel final y $1,7756 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$ para la cachaza lo que es significativo para posteriores estudios en la industria de derivados. Estos resultados indican que el sistema debe ser reestructurado para mejorar su eficiencia y permitir un mayor aprovechamiento de los recursos. Por ello se identificaron posibles alternativas que pueden contribuir a un mejor desempeño del sistema.

Palabras Claves: Emergía, Sostenibilidad, Industria azucarera

ABSTRACT

In the present work it is evaluated the sustainability of the production process of raw sugar from sugarcane in the UEB Sugar Factory “14 de Julio”. In order to accomplish that was used the Emergy Methodology developed by the American ecologist Howard T. Odum doing some adaptations. It was determined that 51,44 % of the emergy of the process comes from the economy and the 48,56 % from natural resources. The Emergy Sustainability Index (ESI) calculated was 1,12 which indicates that the process is not sustainable in the long run however it contributes moderately to the economy. The assessment allowed to know the transformities of the main products of the factory which are: $1,2328 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$ for the raw sugar and $1,2391 \text{ E}+07 \text{ seJ/J}$ for the electricity. Also, it was determined the specific emergy of other important co-products which are: $9,5501 \text{ E}+09 \text{ seJ/g}$ for the bagasse, $1,5957 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$ for the molasses and $1,7756 \text{ E}+10 \text{ seJ/g}$ for the filter cake which is meaningful for the subsequent studies in the industry of derivatives. These results indicate that the system should be reorganized to improve its efficiency and allow a better exploitation of resources. That's why possible alternatives were identified which may contribute to a better performance of the system.

Keywords: Emergy, Sustainability, Sugar industry

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera ha constituido históricamente el sector principal de la economía cubana. Ello se explica, entre otras razones, por su peso decisivo en la dinámica productiva del país, así como en la definición del patrón histórico de la inserción internacional de la isla (Marquetti, 2006). Sin embargo, este desarrollo en la agroindustria azucarera inevitablemente ha traído consigo severos daños al medio ambiente a pesar de los esfuerzos del gobierno revolucionario por su preservación. Por tanto, el reto en la actualidad consiste en lograr su sostenibilidad integrando las actividades humanas a los ciclos de la naturaleza.

En este sentido se han realizado varios estudios, entre los más importantes la conversión de las fábricas de azúcar a biorefinerías (Ramos, 2014). Sin embargo, como estos procesos de reestructuración requieren de inversiones, es de interés conocer en sí misma la sostenibilidad del proceso agroindustrial azucarero existente. Para determinar esto existen varias metodologías entre las que se encuentran el Análisis de Ciclo de Vida (*LCA*), la Huella Ecológica (*Ecological Footprint*), la Huella Hídrica (*Water Footprint*) y el Análisis Multivariado; sin embargo, en la actualidad la Metodología Emergética se ha convertido en una alternativa interesante a esta problemática, una vez que relaciona todas las fuentes de energía, recursos materiales y servicios humanos.

La Metodología Emergética, también conocida como Análisis Emergético o Síntesis Emergética, es un procedimiento usado para evaluar exhaustivamente, empleando unidades similares, las relaciones de un sistema con sus alrededores naturales y antrópicos. En Cuba existe, como precedente a esta investigación, el trabajo “Análisis combinado de exergía/emergía de la agroindustria azucarera de la caña: Caso de estudio” (Calvo, A y col., 2005); pero como se recomienda en la misma investigación es necesario conducir estudios similares con muchos casos, en diferentes sitios, provincias, municipios con el fin de obtener un criterio más exacto.

Para este propósito la provincia de Cienfuegos resulta adecuada. El desarrollo de la agroindustria azucarera en el territorio la ha hecho merecedora del reconocimiento nacional al estar en los últimos años entre las tres mejores provincias en zafra. El mérito es aún mayor, puesto que se logró el plan de producción de azúcar con solo cuatro fábricas: “14 de Julio”, “Antonio Sánchez”, “5 de Septiembre” y “Ciudad Caracas”. Entre estas se destaca

“14 de Julio” por obtener la condición de Vanguardia Nacional del Sindicato de los Trabajadores Azucareros por cuatro años consecutivos además de ser una fábrica que se ha mantenido en operaciones incluso cuando otras cerraron por la crisis económica de la década de los noventa. Por consiguiente, esta se seleccionó como caso de estudio para conducir esta investigación.

Para realizar una evaluación de la sostenibilidad del proceso agroindustrial cañero en la UEB “14 de Julio” mediante el Análisis Emergético es necesario elaborar el inventario emergético a partir de las corrientes de entradas y salidas del proceso que incluye: la sección agrícola de la caña de azúcar y la sección industrial para la producción de azúcar. Aun cuando se reconoce la necesidad de un análisis conjunto de los inventarios, agrícola e industrial, e incluso que los resultados del primero tributan al segundo, dada la complejidad y alcance de una investigación de tal envergadura se consideró favorable afrontar por separado ambos procesos, de ahí que esta investigación estará encaminada al sector industrial.

Problema de investigación

A partir de la necesidad fundamentada anteriormente se plantea como problema de investigación que:

“No existen estudios emergéticos previos en la provincia de Cienfuegos que demuestren si el proceso de producción de azúcar de caña es sostenible.”

El **objeto de estudio** de este trabajo es la “UEB Fábrica de Azúcar 14 de Julio”, con un **campo de acción** definido a la producción de azúcar crudo de caña. Considerando estos elementos se formula la siguiente hipótesis:

Hipótesis

“Si se realizara un estudio emergético en la UEB “14 de Julio” se podrá determinar la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo según criterios emergéticos.”

Objetivo general

Evaluar la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo en la UEB “14 de Julio” mediante indicadores emergéticos.

Objetivos específicos

1. Establecer los fundamentos conceptuales de la emergía y su vinculación a la evaluación de la sostenibilidad de la industria azucarera.
2. Conformar el balance emergético para la producción de azúcar crudo y electricidad en la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.
3. Evaluar la condición actual de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio” mediante la valoración de los indicadores emergéticos.
4. Identificar posibles alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad del sistema.

Estructura de la tesis

Para conducir la investigación la tesis se estructuró en tres capítulos:

En el **capítulo 1** se introduce el concepto de desarrollo sostenible y se identifican algunas causas de la insostenibilidad de la sociedad contemporánea. Se continúa exponiendo el desarrollo de la industria azucarera en Cuba y la importancia de lograr su sostenibilidad para el país. Luego se explican los aspectos termodinámicos y conceptuales esenciales para comprender la metodología emergética.

El **capítulo 2** comienza con una caracterización del objeto de estudio. Después, se propone un algoritmo para conducir la evaluación. Se explican las particularidades del simulador usado para el balance de energía; se destacan las consideraciones asumidas, las fórmulas para el cálculo de los indicadores y las limitaciones del estudio.

En el **capítulo 3** se exponen y analizan los resultados obtenidos. Este se basa principalmente en la información obtenida de la simulación del sistema termoenergético del objeto de estudio y de las diferentes etapas de la metodología emergética. Finalmente, se recomiendan alternativas a evaluar para el desarrollo de la entidad.

Aportes de la Investigación

- 1- Se evaluó la sostenibilidad de la UEB “14 de Julio” mediante un procedimiento novedoso del que no existen trabajos previos en Cienfuegos.
- 2- Se identificaron las unidades de valor emergético de las principales corrientes de entradas y salidas de la fábrica de azúcar UEB “14 de Julio”, permitiendo que este trabajo sirva como referencia para su aplicación en otros casos de estudio.

Resultados obtenidos

- 1- Los resultados de la investigación facilitan la toma de decisiones para minimizar el impacto ambiental de la UEB “14 de Julio”. Los indicadores energéticos proporcionan información para valorar las alternativas más interesantes para el desarrollo de la entidad siguiendo las pautas de la economía ecológica.
- 2- En este trabajo se aboga por lograr sistemas industriales sostenibles. En la medida que se fundamenta a partir de la emergencia la necesidad de adoptar una postura económica ecocéntrica se contribuye a la preservación del medio ambiente.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I. ESTUDIOS DOCUMENTALES.

En este capítulo se realiza una actualización del estado del arte referente al desarrollo sostenible y a la evolución histórica de la industria azucarera cubana. Luego, se analizan las bases termodinámicas para comprender el concepto de emergía, lo que lleva a definir la energía y exergía, así como su relación con la primera y segunda ley de la termodinámica. Se exponen los conceptos de calidad de la energía, transformidad, unidades de valor emergético y los fundamentos de simbología y el álgebra emergética. Por último, se identifican los principales indicadores emergéticos para analizar la sostenibilidad de los sistemas, así como las principales críticas y ventajas de la emergía.

1.1 Desarrollo sostenible

Los patrones de consumo de la humanidad, impulsados por el desarrollo del capitalismo, han llevado al planeta a un estrés cada vez más creciente. Gradualmente se ha creado una conciencia de que esta situación es insostenible en el futuro, más evidente cuando muchos países en desarrollo se han incorporado a los modelos de producción industrial, mientras que los más desarrollados no han dejado de crecer. Por eso en la actualidad uno de los conceptos más discutidos en la comunidad científica es el de desarrollo sostenible.

El concepto de desarrollo sostenible entró a formar parte del vocabulario habitual a partir de la publicación en 1987 del informe << *Our Common Future* >>, conocido también como informe Brundtland, preparado por la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNWECD). El objetivo de esta comisión era relacionar los problemas del medio ambiente con los del desarrollo, combinando la lucha contra la pobreza con la economía y la ecología (Ochoa, 2008). Si bien la definición dada en el informe como “(...) el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (UNWCED, 1987) fue histórico y un avance significativo en la toma de conciencia, no brindaba pautas en cuanto a que rumbo seguir para lograrlo.

Por esto, en la Conferencia de Río de Janeiro de 1992, se conformó un plan de acción para el nuevo siglo conocido como Agenda 21 donde se estableció más precisamente que acciones debían llevar a cabo los gobiernos. Con el paso del tiempo se han realizado otras reuniones como Río+10, Río+20; a principio del 2000 se establecieron los denominados

Objetivos de Desarrollo del Milenio acordados a conseguir para el 2015 y ese año los líderes mundiales reunidos otra vez acuerdan para el 2030 alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Sin embargo, a pesar de los logros alcanzados, la desigualdad de género todavía persiste, existen grandes brechas entre los hogares más pobres y los más ricos, así como entre zonas rurales y urbanas, los conflictos siguen siendo la mayor amenaza al desarrollo humano y el cambio climático y la degradación ambiental socavan el progreso logrado.

El problema de la insostenibilidad de la sociedad industrial estriba en que, a diferencia de la biósfera, no ha sido capaz de cerrar los ciclos de materiales reconvirtiendo, con la ayuda del sol y sus derivados, los residuos en recursos. Con ello el sistema se topa con problemas de escasez de recursos y de exceso de residuos, a la vez que resulta cada vez más difícil y costoso mantener su propia calidad interna. A la luz de lo anterior, se puede afirmar que un sistema económico se hace globalmente más insostenible a medida que utiliza (directa o indirectamente) y degrada cantidades crecientes de la energía y los materiales extraídos de la corteza terrestre o de los obtenidos de la sobreexplotación de ecosistemas, especies o recursos considerados renovables. Estos usos arrojan una huella de deterioro ecológico observable sobre el territorio por el espacio requerido para obtener los recursos o para depositar o digerir los residuos (Díaz, R. y Escárcega, S., 2009).

Por otra parte el objetivo de empujar la economía de las sociedades humanas hacia bases más sostenibles es asumido en generalidad con competencias económicas, pero la sostenibilidad en el tiempo de un sistema viene marcada por sus intercambios con el entorno físico, que escapan a la red analítica usual de los economistas (Naredo, 1994). La economía se halla dentro de la sociedad, dado que todas las partes de la economía humana requieren de la interacción de las personas. Sin embargo, la sociedad es algo más que economía; es también amigos, familias, música, arte, religión y valores que son elementos importantes de la sociedad. La sociedad actual existe totalmente dentro del medio ambiente; nuestros requerimientos básicos —aire, alimentos y agua—vienen del medio ambiente, así como la energía y las materias primas para los hogares, el transporte y los productos de los que depende el ser humano. En síntesis, el medio ambiente envuelve a la sociedad (Díaz, R. y Escárcega, S., 2009). Esta relación se observa en la Figura 1.1.

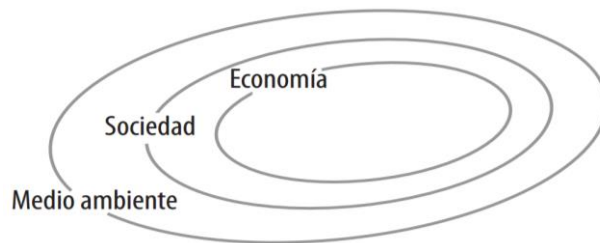


Figura 1.1. Relación economía-sociedad-medio ambiente. **Fuente.** (Díaz, R. y Escárcega, S., 2009).

Por este motivo, la sociedad humana y sus actividades económicas no deben entenderse como un elemento externo que perturba desde fuera a la naturaleza, sino como un componente dinámico que actúa desde dentro de los ecosistemas (Figura 1.2). Las interacciones entre los colectivos humanos y la naturaleza se han hecho tan estrechas que es necesario recurrir a un enfoque ecológico-sociológico-económico para poder desarrollar, de una forma realista y segura, modelos de gestión de los sistemas naturales que sean verdaderamente viables a medio-largo plazo. (Lomas, P. y col., 2006).

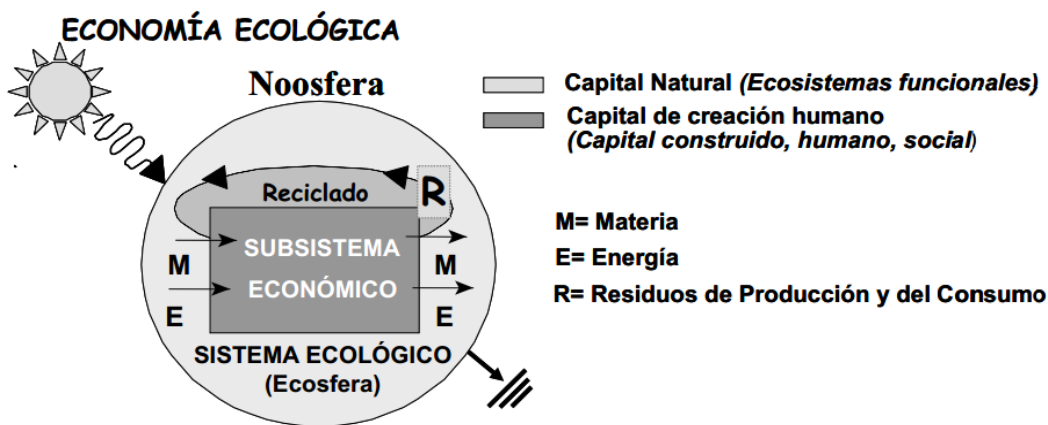


Figura 1.2. Economía como un subsistema de la ecosfera. **Fuente.** (Lomas, P. y col., 2006).

La coyuntura actual demanda mayores esfuerzos y una concepción integral del desarrollo sostenible, entendido como un proceso donde las políticas de desarrollo económico, científico-tecnológico, fiscales, de elevación de la calidad de vida de la población, de comercio, energía, agricultura e industria, se entrelazan con las exigencias de la protección del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, en un marco de justicia y equidad social (García, 2014).

1.2 Industria azucarera cubana

El cultivo de la caña y la producción de azúcar han sido, desde el mismo nacimiento de la nación cubana, base de su economía y un elemento significativamente vinculado a su desarrollo social, a su cultura y a sus tradiciones (Freide, 2015). El conquistador de Cuba, Diego Velázquez, es el que introduce la caña de azúcar traída de Santo Domingo y desde ese tiempo los colonos comienzan a extraer el guarapo para fabricar azúcar. En el siglo XIX, Cuba se comienza a conocer a nivel mundial como productor y exportador de azúcar gracias a la modernización de los ingenios azucareros y el poder transportar la caña por medio del ferrocarril (Díaz, J. C., 2015).

Durante las décadas de 1960, 1970 y 1980 se realizó un amplio proceso inversionista que permitió modernizar y ampliar la capacidad productiva de esta rama. Así, en la zafra 1988-1989 se logró una producción de 8 100 000 t de azúcar, con lo que esta actividad aportó el 20 % del producto interno bruto (PIB) y se utilizó el 57 % de la superficie cultivable del país. Además, representó el 80 % de las exportaciones totales y mostró significativa importancia en el balance energético de la isla al demandar el 30 % del consumo de energía y suministrar el 10 % de la generación total de electricidad. Desde el punto de vista del balance de recursos laborales, se ocupó 14 % de la fuerza de trabajo total y 36 % de la empleada en la industria manufacturera. También se generaron 1,5 millones de t de bagazo para la producción de derivados, principalmente papel y tableros. En esta etapa surgió la producción de levadura torula por fermentación continua que comenzó en el año 1964 y se incrementó a finales de la década del setenta (Ramos, 2014).

Como resultado de la crisis económica de los noventa, la agricultura cañera cubana experimentó una contracción masiva. Esto se manifestó mediante la reducción del área cultivada (o sembrada) de caña, la disminución de los días efectivos (de la molienda de caña de azúcar, o zafra) y el racionamiento de los escasos insumos y recursos disponibles en el país. La crisis incidió negativamente sobre los indicadores principales de la agroindustria cañera como los rendimientos agrícola e industrial, la producción física de azúcar crudo y las exportaciones del dulce (González-Corzo, 2015).

En Cuba la industria de la caña de azúcar está atravesando por un período de reordenamiento y redimensionamiento con el objetivo de alcanzar mayores beneficios

económicos, tecnológicos y ecológicos. Desde hace varios años se ha prestado una gran atención a la diversificación de esta industria, buscando alternativas más atractivas a través de la integración de procesos que tiendan a tecnologías más limpias y nuevas oportunidades de negocios a partir de la biomasa de la caña de azúcar. Las inversiones fundamentales a realizar responden a la estrategia de desarrollo del país a corto, mediano y largo plazo, orientándose prioritariamente a fortalecer la infraestructura necesaria para el desarrollo sostenible de la economía del país (Rabassa, G. y Pérez, A., 2015).

En la actualidad AZCUBA es el grupo empresarial encargado de rectorar las entidades que integran la agroindustria azucarera para el desarrollo de la producción de azúcares, energía eléctrica, derivados de la caña de azúcar y alimentos para consumo humano y agropecuario. AZCUBA administra 56 Centrales Azucareros y casi 100 otras unidades para la producción de azúcar, electricidad, alcohol, ron, levadura, tableros, alimento animal, sorbitol y CO₂ fundamentalmente, así como varios talleres mecánicos para producir y reparar equipos industriales y agrícolas. Heredero de una larga tradición, el capital humano de la industria azucarera está dotado de experiencia, cultura y calificación. Se cuenta con unos 10 mil universitarios, 16 mil técnicos medios y 13 mil obreros calificados. Dos Centros de Investigación y un Centro de Capacitación avalan el desarrollo de investigaciones con resultados en la obtención de nuevas tecnologías y productos y el empleo creciente de sistemas de automatización e informatización integral (MCEIE, 2016).

La agroindustria de la caña de azúcar puede y debe ayudar a afrontar en un futuro inmediato tres importantes desafíos que hoy enfrenta la humanidad: la producción de alimentos, el déficit energético y la preservación del medio ambiente. La agroindustria cañera puede producir energía eléctrica, alcohol (biocombustible, materia prima), azúcar, mieles finales (destino consumo animal y otras producciones), alimento animal, biogás y múltiples derivados, con alto valor agregado. Dadas las posibilidades señaladas anteriormente, esta agroindustria encierra una importancia estratégica para la economía cubana, además desempeña un importante papel en la generación de fondos exportables y en la sustitución de importaciones (González-Corzo, 2015).

Si bien la producción de alimentos y el déficit energético son los retos más apremiantes en cuanto a impacto social directo no puede ser descuidado el factor medioambiental, puesto

que como se planteó previamente la manera en que este sea gestionado impactará decisivamente en la sostenibilidad del proceso.

1.2.1 Etapas del proceso de producción de azúcar crudo

La producción de azúcar consiste en un conjunto de procesos tecnológicos que posibilita obtener como productos azúcares, mieles, bagazo y cachaza, así como electricidad a partir de la caña de azúcar. Se divide en dos fases fundamentales: agronómica e industrial. El primero trata con el cultivo y la cosecha mientras que el segundo con las etapas necesarias para extraer la sacarosa contenida en la planta hasta obtenerla como un producto cristalino de alta pureza y calidad. La importancia de la fase agronómica es innegable puesto que proporciona la materia prima de la fase industrial pero dada su complejidad y los objetivos de este trabajo solo se discutirán los aspectos más significativos de la última.

El proceso de fabricación de azúcar crudo está compuesto por siete etapas principales: preparación de la caña, extracción del jugo, purificación del jugo, evaporación, cristalización, centrifugación y secado y envase. Paralelamente el bagazo es aprovechado como combustible lo que permite el autoabastecimiento de energía en forma de calor (vapor) y electricidad dada la cogeneración. En la Figura 1.3 se observa un diagrama general en el que se muestra cada etapa y las principales corrientes de flujo del proceso. Sin embargo, aunque las secciones de fabricación y cogeneración han sido separadas, en la práctica la integración de estas es tal que una no puede funcionar sin la otra.

Hay que destacar que con el tiempo el proceso ha evolucionado en función de optimizar tres parámetros que inciden a lo largo del proceso: la temperatura, el pH y el tiempo de operación. Las temperaturas usadas son relativamente bajas en comparación con otros procesos debido a que altas temperaturas producen el efecto de caramelización e hidrólisis de la sacarosa. El pH de operación es típicamente neutro o próximo a la neutralidad. Un pH bajo favorece la inversión (hidrólisis) de la sacarosa lo que reduce el rendimiento final pero un pH alcalino propicia en mayor medida las reacciones de Maillard en la que los azúcares reductores reaccionan con aminoácidos formando compuestos fuertemente coloreados y afectando este parámetro de calidad del azúcar. Por último, el proceso enfrenta una carrera contra el tiempo puesto que, aunque se minimiza con buenas prácticas, desde el momento que la planta es cosechada en el campo la inversión de la sacarosa tiene lugar.

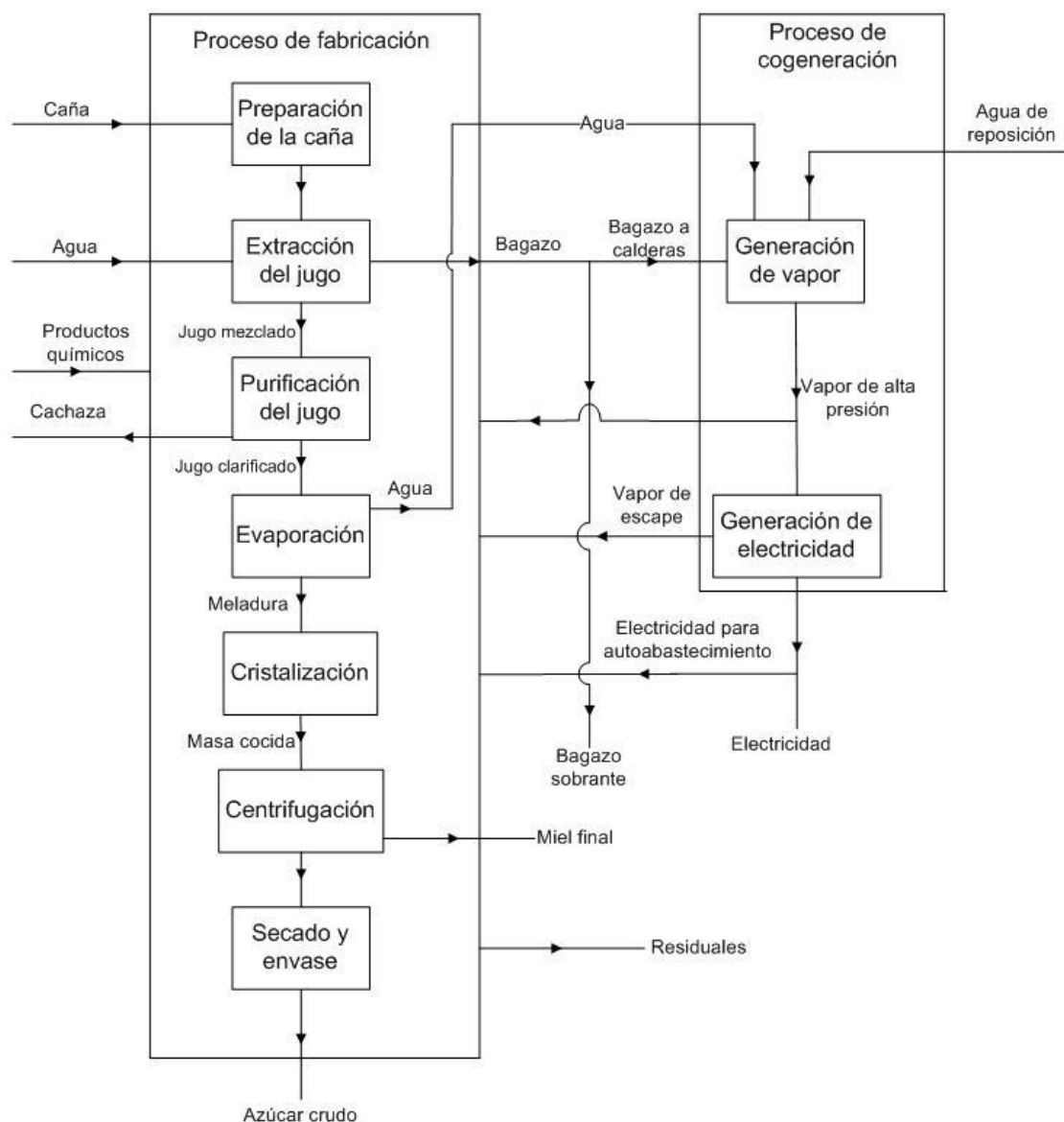


Figura 1.3. Esquema general para la producción de azúcar crudo. **Fuente.** Elaboración propia.

Preparación de la caña

La preparación de la caña consiste en la reducción de tamaño de la caña alimentada a los molinos con el objetivo de facilitar la extracción del jugo contenido en la planta. La reducción de tamaño es conseguida generalmente con el uso de picadoras o cuchillas rotativas localizadas sobre el sistema de conductores de caña y/o el paso de caña por una desfibradora con martillos basculantes. En conductores de tallos enteros de caña

normalmente se instala un nivelador antes de cualquier equipo de preparación para lograr una alimentación uniforme a las picadoras. Con trozos de caña cosechada mecánicamente esto usualmente no es necesario debido a que la manipulación de trozos facilita lograr un nivel uniforme en los conductores alimentadores en forma consistente. Dado que la eficiencia y la capacidad de la planta de extracción dependen considerablemente de la preparación de la caña y el equipamiento de esta etapa puede representar más del 25 % de la demanda total de potencia en una fábrica el tipo de acondicionamiento empleado y su eficiencia es muy importante (Rein, 2012).

Extracción del jugo

El objetivo fundamental de esta etapa es extraer de la caña preparada un jugo con el mayor contenido posible de sacarosa (% pol). Esto se realiza mediante las operaciones unitarias de compresión y lixiviación en un conjunto de molinos dispuestos en serie (generalmente entre 4 y 6 unidades).

Se ha estimado que mediante compresión solo se puede alcanzar una condición límite de extracción en la que el contenido de fibra en el bagazo es de aproximadamente el 50 % de su peso por lo que, si se considera los fundamentos de la transferencia de masa, a la entrada del último molino se añade agua de imbibición y los jugos extraídos se recirculan para ponerlos en contacto con el colchón de bagazo a la entrada de los molinos anteriores hasta llegar al primer molino que no se imbiben. La temperatura del agua oscila entre 60 y 80 °C para favorecer la extracción por el concepto de dilución y la cantidad usada oscila en el orden de 180 y 200 % de la fibra en caña. Esto último usualmente permite asegurar que la concentración del jugo mezclado oscile por los 15 °Brix lo que es importante puesto que posteriormente esta agua será evaporada y de ser añadida excesivamente encarecerá energéticamente el proceso.

Purificación del jugo

La función principal de esta etapa consiste en neutralizar el jugo y eliminar la mayor cantidad de impurezas contenidas en este. Para ello esta etapa a su vez se subdivide en varios procesos como: separación de las impurezas por medio del tamizado, calentamiento, alcalización, clarificación del jugo y filtración de la torta de cachaza.

El jugo que se obtiene de un tren de molinos frecuentemente se denomina como jugo mezclado, siendo una mezcla del jugo primario del primer molino y del jugo secundario proveniente del resto de molinos. Este puede contener más de 3 kg sólidos insolubles/100 kg jugo crudo, pero generalmente tiene alrededor de la mitad de este valor. Esto puede causar problemas en los procesos siguientes, conduciendo a taponamientos por ejemplo en equipos tales como los calentadores. El cernido con mallas normalmente permite reducir esta cifra hasta alrededor de 0,5 kg sólidos, constituyendo la mayoría pequeñas partículas que no causan problemas y pueden ser removidas durante la clarificación (Rein, 2012).

Luego del tamizado se procede a la alcalización que consiste en la dosificación de la lechada de cal al jugo para llevar su pH próximo a la neutralidad. Existen varios esquemas para hacer esto entre los que se encuentra la alcalización en frío, la alcalización en caliente y la alcalización fraccionada. En la alcalización en frío primero se añade la lechada de cal y luego se calienta el jugo, en la alcalización en caliente se hace lo contrario y en la alcalización fraccionada la alcalización y el calentamiento del jugo ocurre en una secuencia de pasos alternos. Entre los tres esquemas la alcalización fraccionada es la más popular dado que posee las ventajas que separa más impurezas, consume menos cal y favorece más la sedimentación, pero a su vez tiene la desventaja que requiere un mayor control dado que una violenta agitación rompe los flóculos entorpeciendo la posterior sedimentación.

La sedimentación ocurre en equipos llamados sedimentadores o clarificadores, en los que las partículas sólidas descienden según las leyes de la caída de los cuerpos en el seno de fluidos. En el fondo del equipo las partículas sólidas se acumulan en un lodo mientras que en la parte superior del equipo se obtiene un fluido claro. La eficiencia de este proceso depende de la diferencia de densidades del sólido y el fluido y de la viscosidad del último según la ley de Stokes por lo que se añade flocculantes para favorecer el proceso. Esta operación unitaria cuenta con la ventaja económica de que aprovecha el efecto de la gravedad permitiendo tratar grandes volúmenes de suspensiones, de ahí su uso en la industria azucarera.

El lodo del fondo del sedimentador contiene altos contenidos de sacarosa por lo que para lograr un rendimiento aceptable se somete a un proceso de filtración en un filtro rotatorio al vacío. De esta operación se obtiene un jugo que es recirculado y una torta de cachaza. Por

su parte el jugo clarificado es tamizado nuevamente para eliminar el bagacillo en la suspensión y posteriormente es calentado antes de entrar a la estación de evaporadores.

Evaporación

La evaporación es la concentración de disoluciones por ebullición. Un evaporador de transmisión indirecta de calor, no es más que un intercambiador de calor modificado. Puesto que la evaporación implica una ebullición, la subcapa gaseosa en contacto con la fase líquida en la interfase líquido-vapor, estará constituida por vapor generado y por consiguiente no habrá resistencia a la transferencia de materia en la fase gaseosa, de ahí que esta operación esté controlada por la velocidad de transferencia de calor y no por la correspondiente de transferencia de materia (Martínez, P. y Rus, E., 2004).

La evaporación es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar y es un factor que determina ampliamente la eficiencia energética. Esta operación incrementa la concentración del jugo clarificado hasta un valor de sólidos disueltos alrededor de 65 a 68 %, por lo que la convierte en el principal consumidor de vapor. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que la fábrica requiere y, por lo tanto, el arreglo de los evaporadores es de gran importancia. El uso de múltiples efectos de evaporación en serie hace posible reducir la demanda de vapor, por lo que la mayor parte del agua es evaporada mediante este proceso. El límite máximo de concentración de la meladura se encuentra en las condiciones de saturación donde empieza la cristalización (Rein, 2012).

Cristalización

La cristalización es la formación de partículas sólidas a partir de una fase homogénea. La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes monocristales, o bien como cristalización de una disolución líquida. La cristalización de disoluciones es industrialmente importante dada la gran variedad de materiales que se comercializan en forma cristalina. Su amplia utilización se debe a dos razones: un cristal formado a partir de una disolución impura es esencialmente puro (excepto que se formen cristales mixtos) y la cristalización proporciona un método práctico para la obtención de

sustancias químicas puras en una condición adecuada para su envasado y su almacenamiento (McCabe, W., Smith, J. and Harriott, P., 1998).

En esta etapa se realiza el cocimiento, que es el proceso en el que la meladura obtenida en la evaporación pasa a la última etapa de extracción de agua, por tanto, a medida que la meladura se concentra, su viscosidad aumenta rápidamente y luego comienzan a aparecer cristales de azúcar. La evaporación se llevará a cabo en un solo efecto. El equipo es similar al de los evaporadores, pero adaptado para manejar el producto viscoso que debe concentrar. Estos equipos reciben el nombre de tachos y de esta operación depende la calidad del azúcar final. Los tachos trabajan al vacío para efectuar la evaporación a baja temperatura y evitar así el azúcar caramelizado. El material resultante que contiene líquido (miel) y cristales (azúcar) se denomina masa cocida (Díaz, J. C., 2015).

Centrifugación

En esta etapa se recibe la masa cocida de los tachos para ser acondicionada y posteriormente someterlas al proceso de centrifugación. El objetivo principal es separar el grano del licor madre o miel para obtener un azúcar de alta pureza y a la vez lograr la mayor agotabilidad de las mieles. La adecuada explotación de las centrífugas definirá parámetros importantes de calidad en el azúcar como la granulometría.

La centrífuga consiste en una canasta cilíndrica diseñada para recibir la masa cocida por tratar y colocada en un eje vertical en cuyo extremo superior se encuentra el motor o la toma de fuerza que mueve a la máquina. La canasta está perforada con numerosos orificios que permiten el paso de las mieles y está provista de anillos circulares que resisten la fuerza centrífuga; la canasta está guarnecida con una malla de metal que retiene el azúcar y deja pasar las mieles (Hugot, 1986).

Existen esencialmente dos tipos de centrífugas utilizadas, las máquinas discontinuas (*batch*) y las continuas. Las máquinas continuas son de menor precio, más fáciles de operar y tienen menores costos de mantenimiento. Sin embargo, producen rompimiento de cristales a la descarga y en consecuencia normalmente no son utilizadas para la producción de azúcares que requieren tamaños de grano específicos. Algunos desarrollos recientes han dado como resultado centrífugas continuas aptas para azúcares de alto grado o pureza, pero aún tienen algunas desventajas asociadas a ellas (Rein, 2012).

Secado y envase

El propósito de esta operación es reducir la humedad del azúcar hasta un valor que cumpla los estándares de calidad del azúcar comercial con el menor consumo posible de energía. Hay ocasiones en que esta operación no es necesaria porque con la centrifugación se logra estos estándares, pero de no ser así es muy importante dado que un contenido alto de humedad aumenta la velocidad con que se degrada del producto consecuencia de la acción de microorganismos como el *Leuconostoc mesenteroides*.

El secado en la industria azucarera tiene características particulares en comparación con otras industrias debido a que el azúcar es un producto termodegradable como se explicó previamente. Generalmente se emplean secadores rotatorios de tambor en los que el azúcar fluye dentro del equipo y es puesta en contacto con el aire caliente. Debe lograrse un compromiso con la temperatura del aire para el secado porque de ser muy baja se retrasa el proceso, pero si es muy alta puede afectar el color del azúcar. Hay que destacar que en esta operación solo se elimina la humedad del azúcar por lo que es importante que no queden restos de sirope o miel sobre las caras del cristal. Luego del secado el azúcar es envasada en sacos para su comercialización, aunque esta también puede ser vendida a granel

Cogeneración de vapor y electricidad

El bagazo procedente del proceso de molienda es transportado en conductores hacia las calderas para ser usado como combustible en la producción de vapor de agua. El vapor de agua es posteriormente utilizado en turbogeneradores de contrapresión o de condensación. Aquí se genera la energía eléctrica utilizada en todo el proceso de la fabricación de azúcar, teniendo un excedente que es entregado al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). En el caso de usar turbogeneradores de contrapresión o de escape, este vapor es utilizado en el proceso de producción de azúcar en sus diferentes etapas de calentamiento (Díaz, J. C., 2015).

Algunos de los parámetros más importantes del proceso de cogeneración están en relación con la disponibilidad de bagazo como combustible, así como con la demanda de vapor y electricidad de la fábrica. Generalmente la cantidad de bagazo producido es suficiente para autoabastecer la fábrica. El bagazo sobrante puede ser quemado para producir más

electricidad e inyectarla en la red, pero dadas las potencialidades del bagazo para crear otros productos con valor agregado se pueden analizar otras opciones.

La demanda de electricidad en 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).

1.2.2 Sostenibilidad en la industria azucarera

Este sistema productivo en los últimos años se ha orientado hacia la búsqueda y adquisición de tecnología para mejorar su eficiencia; en primera instancia para mejorar los rendimientos agrícolas por hectárea (máquinas cosechadoras de alto rendimiento, mejores equipos de transporte, etc.) y luego en la modernización de la industria procesadora para mejorar los rendimientos industriales en la obtención de azúcar, los balances térmicos, para mejorar los volúmenes de bagazo como combustible, para producir más generación de vapor, producir más etanol y energía eléctrica. Cuba no se encuentra ajena o distante de esas realidades (Nova, 2007).

Por otra parte, el crecimiento de los precios del petróleo ha servido de motor impulsor a la producción de caña de azúcar como rama económica y al cambiar el balance oferta/demanda a nivel mundial se ha modificado la estructura competitiva de la agroindustria azucarera. Como en las próximas décadas se espera la tendencia al crecimiento de los precios del petróleo, es de esperar aún más la orientación hacia la bioenergética de este sector agroindustrial (Machín, F. y Fernández, E., 2015). Los estudios realizados en Cuba señalan a la agroindustria de la caña de azúcar, como la de mayores perspectivas a corto y mediano plazo dado que una tonelada de caña es capaz generar con su biomasa electricidad, en un rango entre 25 y 40 kWh/t caña molida a baja presión y en un rango de 120-150 kWh/t a presiones superiores de 63 bar y pudiera incluso generar hasta

200 kWh/t caña molida, mediante el uso de tecnologías de ciclo combinado y turbinas de gas (Peña, 2014).

Por lo tanto, el complejo agroindustrial azucarero requiere proyectos de reordenamiento buscando una mayor integración de los procesos y diversificación de las producciones en concordancia con las fluctuaciones del mercado mundial. Una de las alternativas más atractivas consiste en la reconversión de las fábricas azucareras en biorefinerías (Ramos, 2014). Según el mismo autor, las principales formas tecnológicas a considerar en un proceso inversionista para este propósito especialmente en Cuba son:

- La disposición tecnológica para utilizar jugos de la molienda (4º y 5º molinos y /o filtros) y miel final o miel B como materia prima en la destilería.
- La producción de etanol, alcoholes superiores, ésteres y anhídrido carbónico como producto y co-productos de la destilación.
- La producción de torula y crema de levadura *Saccharomyces* a partir de miel final y la vinaza resultante del proceso tecnológico de la destilería.
- La producción de biodiesel y cera a partir de la cachaza de los filtros.
- La producción de etanol a partir del bagazo.
- La producción de alimento animal a partir de bagacillo y mieles.
- La producción de energía (térmica y eléctrica) a partir del bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC).
- La producción de biogás a partir de cachaza, vinaza y otros residuos agroindustriales.
- El modo logístico de miel propia o vinculada de otras fábricas y el tiempo de operación durante la zafra solamente o en la zafra y después de la zafra.

Sin embargo, aunque el potencial tecnológico de las biorefinerías ha sido claramente definido, la sostenibilidad de la aplicación queda en tela de juicio por la contradicción social de producir alimentos o energía de una misma fuente (Arteaga, L. y col., 2014). Por consiguiente, los estudios de diversificación en regiones cañeras, unidades productivas e ingenios o centrales azucareros y destilerías, requieren ser abordados metodológicamente con técnicas multidisciplinarias para inventariar, evaluar y planificar los recursos por medio del análisis de variables que expliquen niveles de empleo, rentabilidad, precios, insumos,

tecnología, energía y calidad de la materia prima e impactos ambientales que incluya la agricultura diversificada, la propagación de nuevos cultivos y otros proyectos en el ingenio azucarero como biorefinería mediante acciones simples para la sostenibilidad (Aguilar, N., Houbbron, J., E. y Espinosa, R.,A., 2014).

Por ello y no solo en la industria azucarera, desde hace décadas se ha estudiado los sistemas productivos antrópicos en relación con la naturaleza buscando vías de fomentar el crecimiento económico con el mínimo detrimento ambiental. La economía ecológica surge entonces como una ciencia que permite analizar los sistemas en su conjunto, brindando una perspectiva más amplia y abarcadora. Dentro de esta ciencia, la Metodología Emergética constituye un enfoque novedoso e interesante por las posibilidades de análisis que permiten sus procedimientos. Sin embargo, para su aplicación es necesario la comprensión de la relación y diferencia entre los conceptos de energía, exergía y eMergía.

1.3 Energía y Exergía

1.3.1 Energía y primera ley de la termodinámica

El concepto de energía fue introducido en la mecánica por Newton cuando hipotetizó acerca de las energías cinética y potencial. Sin embargo, el surgimiento de energía como un concepto unificado en la física no fue adoptado hasta mediados del siglo XIX y es considerado uno de los logros científicos más destacados del siglo. El concepto de energía es tan familiar en la actualidad que parece intuitivamente entendible, pero a menudo se tiene dificultades para definirlo con precisión. La energía es una cantidad escalar que no puede ser observada directamente, pero puede ser registrada y evaluada por medidas indirectas. El valor absoluto de energía de un sistema es difícil de medir, mientras los cambios energéticos se miden relativamente fácil (Dincer, I. and Rosen, M., 2007).

En el sentido mecánico la energía es la habilidad de realizar trabajo, donde trabajo es la acción de una fuerza actuando sobre un objeto llevando a cabo su desplazamiento. La materia en movimiento se dice tener energía cinética, por su habilidad de cambiar el movimiento de otro objeto. La materia en una posición favorable, como el agua en el tope de una presa, se dice que tiene energía potencial debido a su habilidad de cambiar el movimiento de otro objeto una vez fluya sobre la presa. Otras formas importantes de

energía incluyen la energía térmica, nuclear, electromagnética y gravitacional (Priest, 2006).

Una de las características principales de la energía es que esta puede ser transformada de una forma a otra, pero este proceso está sujeto a determinadas restricciones. La primera ley de la termodinámica establece que la energía es conservada, aunque esta puede ser transferida de un lugar a otro, la cantidad total permanece constante. Así la primera ley de la termodinámica depende del concepto de energía, pero a la inversa la energía es una función termodinámica esencial que posibilita la formulación de la primera ley (Van Ness, H. and Abbott, M., 2008). Como parte de la definición hay que presuponer que para todos los sistemas en equilibrio existe una forma de energía intrínseca que cuantifica el total de energía del sistema denominada energía interna. Si denotamos a w como el trabajo hecho sobre el sistema, q para la energía transferida como calor al sistema y ΔU para el cambio resultante en la energía interna entonces para un sistema cerrado la primera ley de la termodinámica queda expresada mediante la ecuación 1.1.

$$\Delta U = q + w \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Esta ecuación resume la equivalencia entre el calor y el trabajo y el hecho de que la energía interna es constante en un sistema aislado (para el que $q=0$ y $w=0$). La ecuación establece que el cambio de energía interna de un sistema cerrado es igual a la energía que pasa a través de sus fronteras como calor o trabajo. Se emplea la convención de que w y q son positivos si la energía es transferida al sistema en forma de trabajo o calor y negativos si la energía se pierde del sistema. En otras palabras, se ve el flujo de energía como trabajo o calor desde la perspectiva del sistema (Atkins, P. and de Paula, J., 2010).

En el Sistema Internacional de Unidades (SIU) el joule (J) es la unidad estándar de energía, equivalente a $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$, pero al ser tan pequeña en comparación con la cantidad de energía consumida por los sistemas también son utilizadas otras como los kilowatt-hora (kWh) y las calorías (cal); las relaciones entre estas son $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$ y $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$. Al calcular con números muy grandes, o muy pequeños es mucho más cómodo usar la notación científica en la que los números se expresan como un número entre el 1 y el 10 multiplicado por la potencia de 10 apropiada. En la Tabla 1.1 aparecen los prefijos, factores multiplicativos y abreviaturas más usadas para los cálculos en el Sistema Internacional de

Unidades (SIU). Hay que destacar además que una simbología similar a esta, usada comúnmente, es del tipo $a \cdot E^x$, donde a representa el número entre 1 y 10, la E la base 10 y la x el exponente al que es elevada la base. Su uso está dado principalmente cuando en los cálculos se tratan números de diferentes órdenes y cuyos exponentes no están contemplados en los factores multiplicativos de la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Prefijos estándares del SIU con sus significados y abreviaturas. **Fuente.** Elaboración propia.

Prefijo	Factor multiplicativo	Abreviatura	Prefijo	Factor multiplicativo	Abreviatura
atto	10^{-18}	a	deca	10	da
femto	10^{-15}	f	hecto	10^2	h
pico	10^{-12}	p	kilo	10^3	k
nano	10^{-9}	n	mega	10^6	M
micro	10^{-6}	μ	giga	10^9	G
mili	10^{-3}	m	tera	10^{12}	T
centi	10^{-2}	c	peta	10^{15}	P
deci	10^{-1}	d	exa	10^{18}	E

1.3.2 Exergía y segunda ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica expresa la posibilidad energética de que ocurra un proceso, pero no brinda información respecto a su espontaneidad y reversibilidad. Para abordar esta problemática es necesario hacer uso de la segunda ley de la termodinámica, enunciada meticulosamente por Clausius, Kelvin y Planck. Según Clausius es imposible para una máquina que trabaje en un proceso cíclico, sin ayuda de alguna agencia externa, transportar calor de un cuerpo a una menor temperatura hacia otro cuerpo a mayor temperatura. Kelvin y Planck exponen que es imposible construir una máquina, la que operando en un ciclo produzca otro efecto que la extracción de calor de un depósito para convertirlo por completo en trabajo. El primer planteamiento considera la transformación de calor entre dos depósitos mientras que el segundo la transformación de calor en trabajo. Aunque los planteamientos de Clausius y Kelvin-Planck parecen ser diferentes realmente son equivalentes en el sentido que la violación de uno implica la violación del otro (Rajput, 2007).

La segunda ley de la termodinámica tiene una forma distinta a otras leyes físicas puesto que no es una ecuación sino un enunciado de imposibilidad. Para expresar esta ley como una relación cuantitativa se aborda mediante otra función de estado intrínseca del sistema llamada entropía. Se establece que el cambio entrópico de cualquier proceso real (considerando el sistema y sus alrededores como conjunto) es positivo, tendiendo a cero mientras el proceso se acerca a la reversibilidad (ecuación 1.2). Luego, la entropía está relacionada con el desorden del sistema; a mayor cambio entrópico mayor desorden y menor reversibilidad. Otra interpretación de esta es como una medida de la cantidad de energía no disponible en el sistema en un momento dado.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \geq 0 \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Así, la segunda ley de la termodinámica establece la diferencia de calidad de las formas de energías y explica por qué algunos procesos pueden ocurrir espontáneamente y otros no.

La exergía viene a ser entonces la cantidad de trabajo que puede ser realizado por un subsistema en la medida que este se aproxima al equilibrio termodinámico con sus alrededores por una secuencia de procesos reversibles. El término fue acuñado por Zoran Rant en 1953 de las palabras griegas *ex* (externo) y *ergos* (trabajo). Las mediciones exergéticas son realizadas relativas a un estado de equilibrio donde no hay gradientes de ningún tipo. Esto implica uniformidad de temperaturas, presión, densidad, composición química, así como campos gravitacionales y magnéticos uniformes. Así la exergía de un subsistema es una medida de su “distancia” del equilibrio (Wall, 2006).

La energía es conservada de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, pero la exergía, aunque similar en algunos aspectos, es diferente como se puede observar en la Tabla 1.2. Aproximadamente, representa una medida cuantitativa de la utilidad de un tipo de energía o sustancia. Más rigurosamente, la exergía es una medida de la habilidad de realizar trabajo (o el trabajo potencial) de la gran variedad de corrientes (másicas, calóricas, etc.) que fluyen a través de un sistema. Un atributo fundamental de la exergía es que hace posible comparar en una base común interacciones (*inputs*, *outputs*) que son diferentes en el sentido físico. Otro beneficio de la contabilidad exergética de las corrientes de un sistema es que

hace posible determinar la extensión en la que el sistema destruye exergía, lo que es proporcional a la entropía generada (Dincer, I. and Rosen, M., 2007).

Esto constituye un avance significativo para analizar y mejorar los procesos pues toma en consideración no solo la cantidad de energía, sino también que parte de esta es realmente utilizable.

Tabla 1.2. Comparación entre la energía y la exergía. **Fuente.** (Dincer, I. and Rosen, M., 2007).

Energía	Exergía
Depende solo de las propiedades de la materia o la energía, es independiente de las condiciones ambientales	Depende tanto de las propiedades de la materia y la energía como del medio ambiente
Tiene valores diferentes de cero en el equilibrio con el medio ambiente (incluyendo la igualdad con mc^2 en concordancia con la ecuación de Einstein)	Igual a cero cuando se encuentra en equilibrio con el medio ambiente
Se conserva en todos los procesos, basado en la primera ley de la termodinámica	Se conserva para los procesos reversibles y no se conserva para los procesos reales (donde es parcial o completamente destruida debido a irreversibilidades) basado en la segunda ley de la termodinámica
No puede ser destruida o producida	No puede ser producida o creada en los procesos reversibles, pero es siempre destruida (consumida) en los procesos irreversibles
Aparece en muchas formas (ej. Energía cinética, energía potencial, trabajo, calor)	Aparece en muchas formas (ej. Exergía cinética, exergía potencial, trabajo, exergía termal) y es una medida sobre la habilidad de producir trabajo
Solo es una medida de la cantidad	Es una medida de la cantidad y calidad

1.4 Emergía

1.4.1 Definición de eMergía

Los trabajos y teorías desarrolladas por Alfred J. Lotka en el siglo pasado han creado una polémica en la comunidad científica hasta la actualidad. Sus estudios en la energética de sistemas lo llevaron a postular que: “(...) en la lucha por la existencia, la ventaja debe ser para aquellos organismos cuyos dispositivos captadores de energía sean más eficientes” añadiendo posteriormente que “la selección natural tiende a hacer que los flujos de energía a través de los sistemas sean máximos” (Lotka, 1922). Lotka sugirió la maximización de poder energético como cuarta ley de la termodinámica (Brown, M., T. et al., 1999).

Siguiendo los principios teóricos de la ecología y la energética de sistemas, Howard Thomas Odum (Anexo 1) observaba que, en 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. Esta observación 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. La conclusión obvia es que existe una jerarquía de energías según su calidad (Lomas, P., Di Donato, M. y Ulgiati, S., 2007).

Basado en los principios de la energética, teoría de sistemas y ecología se define la emergía como la disponibilidad de energía de un tipo que es usada en las transformaciones directas e indirectas para crear un producto o servicio. (Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c). En concordancia con la jerarquización de la energía, Odum y sus colaboradores tomaron la energía solar como base común para evaluar otras formas de energía puesto que en principio esta es la principal fuente del planeta si se considera un sistema termodinámico. La unidad de la emergía es entonces el emjoule (seJ). Entonces, a diferencia del joule que expresa la cantidad de energía disponible que puede ser usada en el presente, el emjoule expresa la energía usada directa e indirectamente para producir un bien o servicio (Voora, V. and Thrift, C., 2010).

Nótese y esto es muy importante a la hora de diferenciar conceptos, que no se refiere a la cantidad de energía solar contenida en un determinado producto (que sería una aproximación particular de su energía incorporada), sino a la cantidad de energía (no sólo solar, sino cualquiera que sea su origen) con calidad referida a la de la energía solar (es decir, el equivalente de cada una de estas energías en términos de calidad solar) que es necesaria para generarlo. Se trata de calcular el coste en términos de energía (de la misma calidad) movilizadas del conjunto de materiales y energía usados en generar un determinado producto (Lomas, P., 2009). Entonces la emergía puede ser considerada como la “memoria

energética” que es la memoria 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 (Saldini, F. et al., 2016).

Hay que decir que la emergía también puede verse desde un punto de vista material, en el sentido de la existencia de una jerarquía de materiales que iría desde aquellos presentes de forma más o menos difusa en la corteza terrestre y que para ser explotados, normalmente tienen que pasar por un proceso de concentración, refinado, cocinado, etc., hasta aquellos que ya han pasado por distintos procesos y que pueden ser útiles a la sociedad directamente, todo ello a través de un mediador, la energía. Así, lo habitual en el procedimiento de la síntesis emergética no es tanto tratar de reducir los distintos componentes materiales, energéticos, monetarios, etc. a energía solar como valor de cambio físico (la emergía no es una teoría del valor económica), sino más bien tratar de introducir tanto elementos materiales como energía en el cálculo del trabajo realizado por la naturaleza para generar un determinado sistema, un determinado componente del sistema, etc., que es medido en equivalentes de energía solar, como corresponde a la propia definición de emergía. (Lomas, P., 2009).

Luego si se reformula el principio de Lotka usando esta vez la eMergía obtenemos el principio de máxima potencia emergética (*maximum empower*) que sugiere la maximización de trabajo útil a todas las escalas expresándose como: “(...) a todas las escalas los sistemas que prevalecen sobre otros, primero, desarrollan el mayor trabajo útil de fuentes que ingresan emergía reforzando procesos productivos, superando limitaciones y segundo, incrementan la eficiencia de ese trabajo útil” (Brown, M., T. et al., 1999). Es importante destacar que el término útil es usado aquí. El trabajo útil es reforzante y definido como el uso de la entrada de emergía en acciones retroalimentativas que garanticen y, de ser posible, incrementen el flujo emergético. La disipación de energía sin contribución al incremento del flujo de emergía no es reforzante y no puede competir con sistemas que usen los flujos emergéticos de esta manera (Brown, M., T. and Herendeen, R., A., 1996).

1.4.2 Unidades de valor emergético. Transformidad

Una expresión intensiva de la emergía es la unidad de valor emergético (UEV), o la emergía solar requerida directa o indirectamente para crear 1 J o 1 g de un producto o

servicio (Saldini, F. et al., 2016). Para poder transformar las diferentes calidades de energía o materia a la calidad de energía solar correspondiente (o emergía), se usa un factor de equivalencia, la transformidad o la energía específica, respectivamente, que informan qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesaria para generar una unidad de energía o materia de mayor calidad. Por tanto, la transformidad tiene unidades de seJ/unidad de energía y la energía específica de seJ/unidad de masa (Lomas, P., Di Donato, M. y Ulgiati, S., 2007). Igualmente se define el valor emergético monetario expresado en seJ/\$ para analizar la influencia de los flujos monetarios que entran y/o retroalimentan a los sistemas.

Por ejemplo, si 4000 emjoules solares son requeridos para generar 1 joule de madera, entonces la transformidad solar de la madera es 4000 emjoules solares por joule (abreviado seJ/J) (Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c). Uno de los conceptos básicos detrás de la transformidad es que los sistemas transformantes de energía requieren una multitud de formas como reactantes (radiación fotosintéticamente activa, electricidad, calor de alta temperatura, energía química libre, etc.) para generar un producto energético con características diferentes a la de cada reactante, a menudo en múltiples dimensiones (fase química, densidad energética, densidad másica, color, contenido informativo, etc.). Típicamente las cadenas o redes energéticas de transformación en los sistemas están unidas de manera que las salidas de unas son las entradas de otras. Dado que la segunda ley de la termodinámica dicta que la energía útil generada en la salida tiene que ser menor que el total de energía en la entrada, la transformidad solar de las energías generadas incrementan con cada transformación en los sistemas (Tilley, 2014). En el Anexo 2 se ejemplifica lo antes expresado.

Las unidades de valor emergético constituyen una medida de la eficiencia ya que relaciona las entradas a una salida. A menor transformidad o emergía específica, más eficiente la conversión. De la segunda ley de la termodinámica se deriva que existe un valor mínimo de las unidades de valor emergético consistente con el principio de máximo poder. Ya que no existe una manera de calcularlos directamente, la menor transformidad encontrada en sistemas actuantes en largos períodos de tiempo es usada como aproximación. Para estimar el potencial teórico de algunos sistemas es apropiado usar la mejor (más pequeña) transformidad conocida (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004).

Este uso de transformidades calculadas en otros tiempos y para procesos que pueden estar en otras partes del mundo es molesto para algunos. De hecho, se sabe bien que no existe una sola transformidad para un producto, sino un rango de transformidades. Existe probablemente un límite inferior, bajo el que un producto no puede ser elaborado y existe un límite superior, en que, en teoría, uno pudiera producir maíz, por ejemplo, con una infinita cantidad de gasto de combustible y así tener una transformidad infinitamente grande. Para algunos productos se han calculado varias transformidades en diferentes partes del globo y por diferentes maneras (Brown, M., T. and Herendeen, R., A., 1996).

1.4.3 Simbología emergética

El punto de partida de la síntesis emergética como un nuevo campo de estudio es que se pueden comparar diferentes tipos de energía utilizando factores de conversión que muestran la cantidad de tipos de energía equivalentes. Al conectar diferentes tipos de energía se puede asociar varias partes y visualizar la complejidad de una manera sencilla, a través del uso de diagramas, a partir de los que se hacen cálculos de flujos y depósitos (Odum, H., T., 1996). La metodología ha sido usada para modelar y analizar diversos sistemas desde ecológicos, agrícolas hasta industriales y sociales.

En la medida que se refinó la teoría Odum y sus colaboradores desarrollaron una simbología similar a otros sistemas de modelación, con analogías a lenguajes de programación para aprovechar las similitudes de los sistemas objeto de estudio, permitiendo una representación más estandarizada y comprensible de los mismos. El primer paso de cualquier evaluación es dibujar el diagrama sistémico energético para identificar las entradas a ser evaluadas. Los ítems y flujos son ordenados de izquierda a derecha en orden de emergía (Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c).

Un ejemplo general de este tipo de diagrama se expone en la Figura 1.4 mientras que en el Anexo 3 se detallan los símbolos más comunes. Por otra parte, aunque el sistema tenga características distintivas a razón a flujos emergéticos, las entradas podrán ser agrupadas como recursos renovables (R), recursos no renovables (N) y procedentes de la economía, adquiridas como bienes y servicios comprados (F) como se observa en la Figura 1.5.

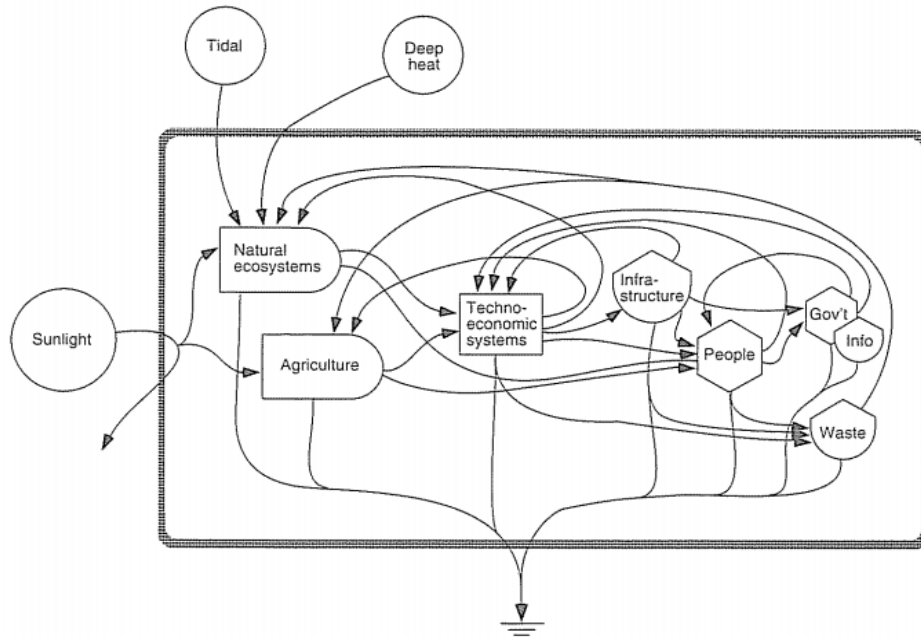


Figura 1.4. Ejemplo de diagrama emergético. **Fuente.** (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004).

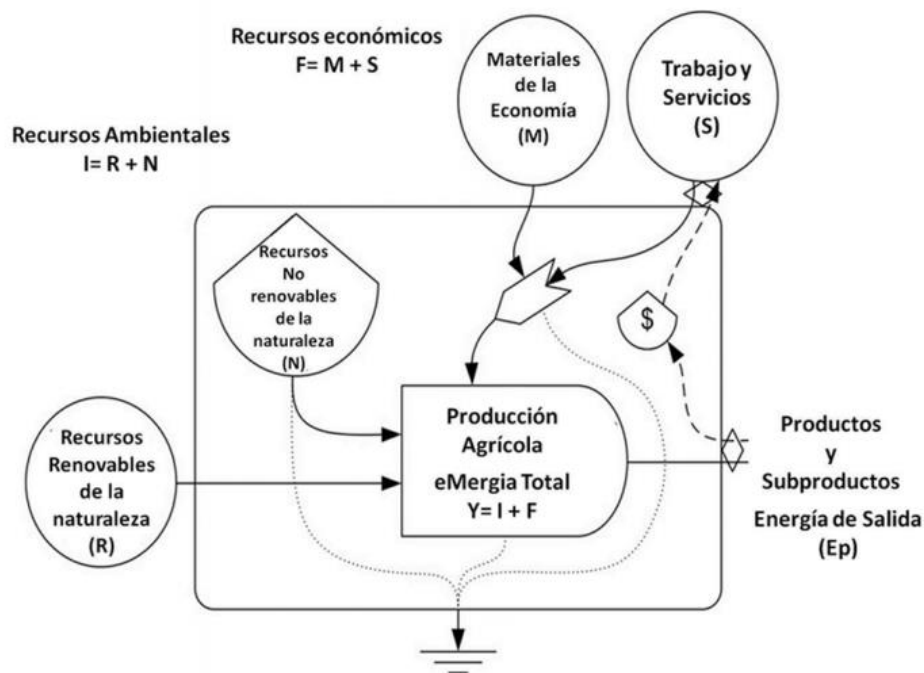


Figura 1.5. Clasificación de los recursos. **Fuente.** (Aguilar, N., Rosas, J. y Espinosa, R., 2015).

Hay que destacar que en dependencia de los límites del sistema y de las consideraciones tomadas por el evaluador puede haber más de una salida de las unidades transformadoras de energía. Estas salidas pueden ser separaciones (*splits*) o co-productos. En los *splits* el empoder (seJ/tiempo) es dividido pero la transformidad y la emergía por masa es la misma. En los co-productos la emergía es la misma pero los flujos energéticos y las transformidades son diferentes. La manera de representar los *splits* y co-productos se muestra en la Figura 1.6.

La diferencia entre co-productos y *splits* es importante. Muchos procesos producen más de una salida (por ejemplo, la agricultura produce tallos y espigas de maíz, un aserradero produce madera y polvo, o un proceso manufacturero que produzca un bien y un ‘residuo’ de co-producto). Cuando un proceso proporcione dos o más salidas, no puede producir una sin generar la otra; por lo que el total de entrada emergética es asignada a cada salida. Cada una es requerida y cada una requiere el total de entrada emergética para su producción (Brown, M., T. and Herendeen, R., A., 1996). Esto conlleva a que en los balances energéticos la emergía que entra a un sistema puede o no conservarse.

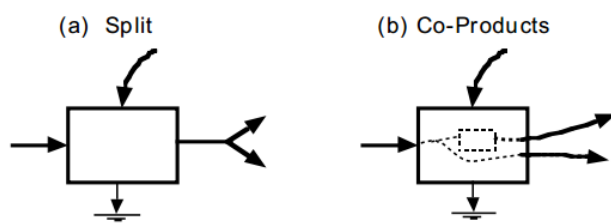


Figura 1.6. Representación de *splits* y co-productos. **Fuente.** (Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c).

1.4.4 Álgebra emergética

Dado que la emergía es igual a la energía disponible por su transformidad (ecuación 1.3), la aplicación práctica del análisis emergético requiere información de ambos. Mientras la información sobre el contenido energético de los flujos económicos y medioambientales está ampliamente disponible, las transformidades de esas cantidades son a menudo desconocidas o estimadas con aproximaciones de primer orden. Como resultado, información precisa sobre las transformidades de las cantidades y flujos del sistema bajo estudio es a menudo el factor limitante en desarrollar la evaluación emergética. (Li, L. et al., 2010)

$$Emergy (seJ) = Available\ energy\ (J) \cdot Transformity\ \left(\frac{seJ}{J}\right) \quad Ecuación\ 1.3$$

Las reglas para manejar co-productos y retroalimentaciones fueron por primera vez referidas como algebra emergética por David M. Scienceman (1987). Un planteamiento sistemático de estas fue provisto en el capítulo seis del libro “*Environmental Accounting. Emergy and Decision Making*”(Odum, H., T., 1996) y una comparación entre los cálculos emergéticos y de la energía incorporada (*embodied energy*) puede verse en el artículo “*Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view*” (Brown, M., T. and Herendeen, R., A., 1996). Luego las reglas del algebra emergética pueden ser resumidas como:

1. Para un proceso en estado estable, todos los flujos emergéticos de entrada son asignados a los flujos de salida.
2. Cuando hay más de una salida (co-productos) del proceso cada una porta el total de flujo emergético de entrada del proceso, pero las transformidades y demás unidades de valor emergéticos son diferentes para cada una de estas corrientes.
3. Cuando una salida se divide (*splits*) en dos o más corrientes del mismo tipo, el flujo emergético es dividido en cada corriente basado en la fracción del total de energía o flujo de materiales de la corriente; por consiguiente, la transformidad y la emergía específica es la misma para cada una de las separaciones (*splits*).
4. La emergía de los flujos de retroalimentación no pueden ser contadas puesto que de sumarse algebraicamente daría una emergía mayor que la de la fuente de la que fueron derivadas.

Un ejemplo de la aplicación de estas reglas se observa en la Figura 1.7 para cuatro procesos básicos: (a) proceso en serie, (b) proceso con co-productos, (c) proceso con bypass y (d) proceso con retroalimentación. El ejemplo mostrado resulta sencillo, pero a medida que se incrementan los flujos de entradas y salidas del sistema, así como interacciones internas los cálculos se hacen cada vez más complejos considerando además que debe evitarse el doble conteo. En el trabajo: “*Emergy algebra: Improving matrix methods for calculating transformities*” (Li, L. et al., 2010) se introduce un modelo matricial para simplificar estos cálculos aunque existen otros métodos como son el *Track Summing Method*, el *Minimum Eigenvalue Model* y el *Linear Optimization Model*.

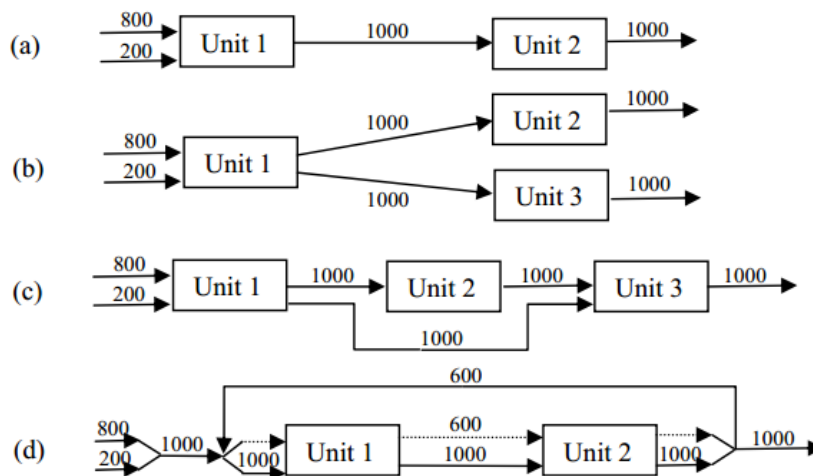


Figura 1.7. Ejemplos del uso de las reglas emergéticas. **Fuente.** (Sha, S., Melin, K. and Hurme, M., 2013).

1.4.5 Indicadores emergéticos

Los indicadores emergéticos son herramientas que permiten caracterizar los sistemas y al compararlos determinar cuáles son más eficientes en el aprovechamiento de los recursos, siempre dentro de los criterios y limitaciones del método. Sirven como un instrumento de ayuda en la gestión y la toma de decisiones que favorezcan políticas orientadas a la sostenibilidad de los mismos, ya que consideran los recursos naturales, la labor humana y el aporte de la economía. A continuación se explica el significado de algunos, mientras que en los Anexos 4 y 5 se amplía esta información.

La transformidad (*Transformity*, Tr) es una medida de la eficiencia del sistema en estudio al compararse con otros sistemas productivos. A mayor valor de la transformidad menor es la eficiencia ya que indica la cantidad de energía solar equivalente que el sistema requiere para producir un determinado producto. Indica la posición jerárquica de un artículo en la escala termodinámica de la biosfera y puede ser considerado como un factor de calidad desde el punto de vista de su dinámica (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004).

La razón de renovabilidad (*Renewability*, % R) evalúa la sustentabilidad del sistema de producción. Está definido como la relación entre el contenido de emergía de los recursos renovables (agua superficial o subterránea, lluvia, sedimentos, biodiversidad) dividido por el total de emergía usada para obtener el producto y se expresa en porcentaje. De esta

definición se deduce que los sistemas naturales tendrán valores altos de renovabilidad (cerca de 100%), mientras que valores bajos de renovabilidad indican mayor uso de recursos naturales no renovables para la obtención del producto (Sánchez, V., Gutiérrez, L. y Osorio, J., A., 2006).

La tasa de eficiencia emergética (*Emergy Yield Ratio*, EYR), se define como la emergía total utilizada por el producto (Y) dividida por la emergía de los insumos de la economía (F). De manera general los sistemas consumen recursos tanto naturales como provenientes de la economía (obtenidos a partir de recursos naturales que fueron sometidos a procesos de transformación por otros sistemas). Un valor de EYR igual a la unidad indica que la emergía liberada por el sistema es igual a aquella invertida con recursos de la economía; valores de EYR superiores a uno indican que el sistema fue capaz de disponer de energía primaria para la sociedad y cuanto mayor sea este valor menor la dependencia del sistema de la inversión económica y mayor es su competitividad. Por lo tanto, la tasa de eficiencia emergética es una medida de la ganancia de energía primaria disponible para ser utilizada por la sociedad.

La razón de carga ambiental (*Environmental Loading Ratio*, ELR) es la relación entre la suma de los recursos no-renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R), también es adimensional. Cuando el valor del índice es alto, mayor será el impacto ambiental del sistema. También indica que los costos de producción son más altos por lo que su precio final se incrementará, haciendo que el producto o zonas productoras sean menos competitivos en el mercado con una relación de carga ambiental más baja (Aguilar, N., Rosas, J. y Espinosa, R., 2015).

El Índice de sostenibilidad emergética (*Environmental Sustainability Index*, ESI) se define como la razón entre EYR y ELR y es una medida de la contribución potencial de un sistema (EYR) por unidad de carga ambiental o impacto ambiental (ELR) en el área que ocupa el sistema. Un valor del ESI igual a cero ocurre solo para aquellos ecosistemas que no han sido explotados (F igual a cero). Valores de ESI inferiores a 1 indican sistemas que consumen recursos y valores superiores a 1 sistemas que contribuyen con la liberación de recursos disponibles para el aprovechamiento por el sector económico sin afectar el equilibrio del medio ambiente.

1.4.6 Principales críticas y aciertos de la metodología emergética

Al igual que otras metodologías la emergía ha sido cuestionada. Las críticas han sido de manera general concernientes a que el método: (1) carece de enlace con otras disciplinas, (2) carece de adecuados detalles en los métodos subyacentes, (3) es data y computacionalmente intensivo y, (4) se basa en generalizaciones que permanecen sin probar (Voora, V. and Thrift, C., 2010).

La economía moderna, que se concentra en el hombre y sus valores y no en el mundo biofísico, ha dudado sobre la habilidad de la teoría emergética para capturar el valor de los productos para los humanos. Algunos argumentos comunes son que la emergía de un galón de aceite de ballena no ha cambiado mientras su valor para los humanos sí. Además, dos pinturas con emergías similares pueden tener valores considerablemente diferentes, especialmente si una de ellas fue hecha por un renombrado pintor. 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 emergética 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, J., L. and Bakshi, B., R., 2004).

Otro de los aspectos más criticados es el Principio de Máxima Potencia Emergética (Empoder). Mientras algunos sistemas han mostrado seguir este principio, afirmar su aplicabilidad general a todos los sistemas implica que este puede explicar el orden del universo. No es sorprendente que este planteamiento, todavía sin corroborar, haya sido extremadamente controversial. Se argumenta que el comportamiento de sistemas complejos no puede ser explicado con un principio de optimización unidimensional categorizándolo como simplista. Sin embargo, para las aplicaciones ingenieriles la aceptación del principio de Máximo Empoder no es esencial para el uso del análisis emergético que proporciona una noción respecto a la contribución de los ecosistemas brindando información invaluable para el diseño y la evaluación de los sistemas (Hau, J., L. and Bakshi, B., R., 2004).

Además, ha sido discutido que la relación entre emergía y otras propiedades termodinámicas es cuando menos confusa y que la cuantificación de los flujos emergéticos al combinar diferentes escalas de tiempo o espacios geográficos para determinar

transformidades introduce cierta incertidumbre en los resultados. Sin embargo, otras metodologías con gran difusión, entre las más conocidas el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), también son objetivo de ataques similares.

Ante las críticas de los economistas los “emergistas” alegan que el análisis emergético 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. No obstante, los practicantes de la metodología emergética han tratado de comunicar la importancia del enfoque del método convirtiendo la emergía en emdólares. Esta técnica ha sido recibida con mucho escepticismo por parte de los economistas que alegan que se introduce un doble conteo. Además, expresar la emergía en emdólares entra en conflicto con el argumento que el dinero es una medida incompleta del bienestar, lo que es usado para reafirmar las críticas. Sin embargo, esta conversión provee una medida para comunicar la importancia de los flujos emergéticos a los directores de políticas que basan sus decisiones en medidas monetarias (Voora, V. and Thrift, C., 2010).

La economía tradicional sostiene la visión de que la complejidad de los mercados económicos mundiales, con su integración global y aspectos como las deudas, derivados y demás, no están sujetas a limitaciones termodinámicas y que la cantidad de dinero puede ser incrementada indefinidamente a través del uso de instrumentos económicos, con poca o ninguna atención a las realidades biofísicas. Pero es evidente por las presentes acciones de los gobiernos del mundo, que están desplazando millones de personas, degradando el ambiente, haciendo guerras y creando “instrumentos económicos” (todo por continuar el control de países y sus recursos), que la circulación de dinero está en última instancia regida por el principio fundamental de que no se puede hacer trabajo sin el consecuente gasto de energía (Brown, M., T. and Ulgiati, S, 2011).

Por su parte el Principio de Máxima Potencia Emergética, a pesar de ser uno de los aspectos más criticados y discutidos del método, tiene un importante significado termodinámico y ecológico en el marco de los sistemas complejos adaptativos y es uno de los campos de investigación que actualmente se están desarrollando con más posibilidades e interés dentro de la evolución del método y sus posibles aportaciones a la Economía Ecológica. Nótese que, frente a las acusaciones de constituir un criterio potencialmente

sociobiológico (propicio a justificar injusticias sociales y aspectos de superioridad de raza) que algunas veces ha recibido esta idea, H.T. Odum hace énfasis en la competición entre diseños y relaciones frente a la competición entre individuos dentro de esos diseños o relaciones. No se debe olvidar que la emergía es un indicador ligado más a las relaciones que a los componentes de los sistemas (Lomas, P., 2009)

Entonces, a pesar de estas críticas el uso de la metodología emergética 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 en bajo un marco común (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004; Lomas, P., 2009).

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

En este capítulo se analizan las características del objeto de estudio: ubicación geográfica y particularidades del sistema tecnológico y termoenergético. Posteriormente, se describen los pasos empleados para conducir la evaluación de la entidad. A lo largo del capítulo se va fundamentando el proceso de obtención de datos, el uso de símbolos y ecuaciones. Por último, se definen los indicadores emergéticos empleados para evaluar el sistema y se explica la manera de interpretarlos.

2.1 Caracterización del objeto de estudio

2.1.1 Localización geográfica

La UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio” se localiza en el municipio de Rodas (Figura 2.1) y forma parte del Grupo Empresarial Agroindustrial AZCUBA en Cienfuegos. Se encuentra ubicada a tres km de la carretera que conduce al municipio Abreus, situada en el centro sur de la provincia Cienfuegos. Limita al norte con el Consejo Popular Ariza, al sur con la Refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos”, al este con el Consejo Popular Venta del Río y al oeste con el municipio Abreu.

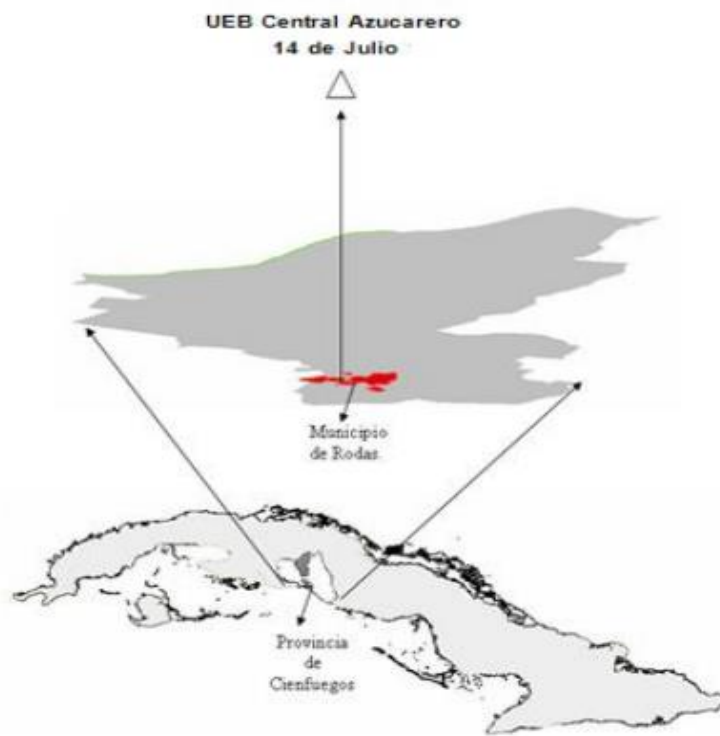


Figura 2.1. Localización geográfica de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. **Fuente.** (Entenza, 2013).

2.1.2 Características del esquema tecnológico

La planta moledora posee un tándem completamente electrificado y se compone de 5 molinos Fulton inclinados. El proceso de fabricación es capaz de producir por encima de las 374 t de azúcar cada día. Cuenta con calentadores líquido a líquido, Vampiros y WEBER modificados, un Clarificador BTR, un pre-evaporador de 10 800 pcsc, un quintuple de 28 000 pcsc, seis tachos que funcionan al vacío, un cristalizador rápido de 3^{ra}, dos graneros, dos cristalizadores tradicionales de azúcar comercial y finalmente posee 4 centrífugas comerciales y otras 5 polacas para masa cocida B y tres centrífugas de doble semilla. Con los trabajos realizados con relación a la compactación del proceso, el tiempo de retención disminuyó a 17,7 horas aproximadamente (Tirado, 2011).

En el sistema de generación de vapor el combustible usado es el bagazo proveniente de la molienda. Existen tres generadores de vapor del tipo EVELMA, todos modificados y cada uno de ellos tiene una capacidad instalada de 9,72 kg/s de vapor sobrecalentado a una presión de 1821 kPa y temperatura de 623,15 K (350 °C). El área de generación eléctrica cuenta con dos turbogeneradores de 4 y 2,5 MW de potencia respectivamente, existe una válvula reductora 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 266 kPa y temperatura 409 K) (Álvarez, 2016).

El sistema de tratamiento de residuales de la fábrica comienza con 800 m de canal abierto que transporta el efluente industrial hasta un sistema de dos lagunas de oxidación en serie cada una con 5200 m³ para un total de capacidad de 10 400 m³. 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.

En el Anexo 6 se puede observar el mapa general del proceso mientras que en la Figura 2.2 la integración del bloque de cogeneración y el proceso de fabricación.

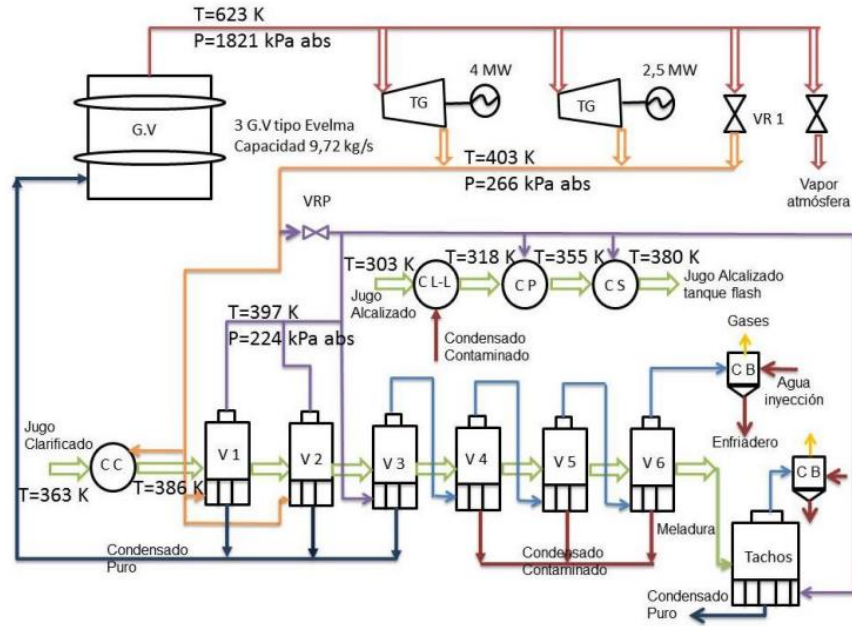


Figura 2.2. Integración del bloque de cogeneración y el proceso de fabricación. **Fuente.** (Álvarez, 2016).

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, alimento animal, otros derivados (miel, cachaza y bagazo) así como algunas producciones agropecuarias.

2.2 Metodología de la investigación

La Metodología Emergética es empleada para evaluar las relaciones de un sistema con el medio ambiente y las actividades antrópicas. Para su aplicación se comienza por definir los límites espacio-temporales del sistema y modelarlo mediante la simbología emergética para describir sus características principales. Posteriormente se realiza un balance energético que tributa a la construcción de una tabla en la que se resume los flujos de las principales corrientes para luego multiplicarlas por sus transformidades u otras unidades de valor emergético (UEV) previamente identificadas convirtiéndolas en valores emergéticos. Luego se calculan y analizan diferentes índices que brindan información en cuanto a la sostenibilidad del sistema lo que permite comprender sus potencialidades y deficiencias. Los indicadores pueden servir tanto para realizar una evaluación del sistema como para comparar alternativas y su efectividad. En la Figura 2.3 se muestran las etapas previamente explicadas, así como las adecuaciones y particularidades de esta investigación.

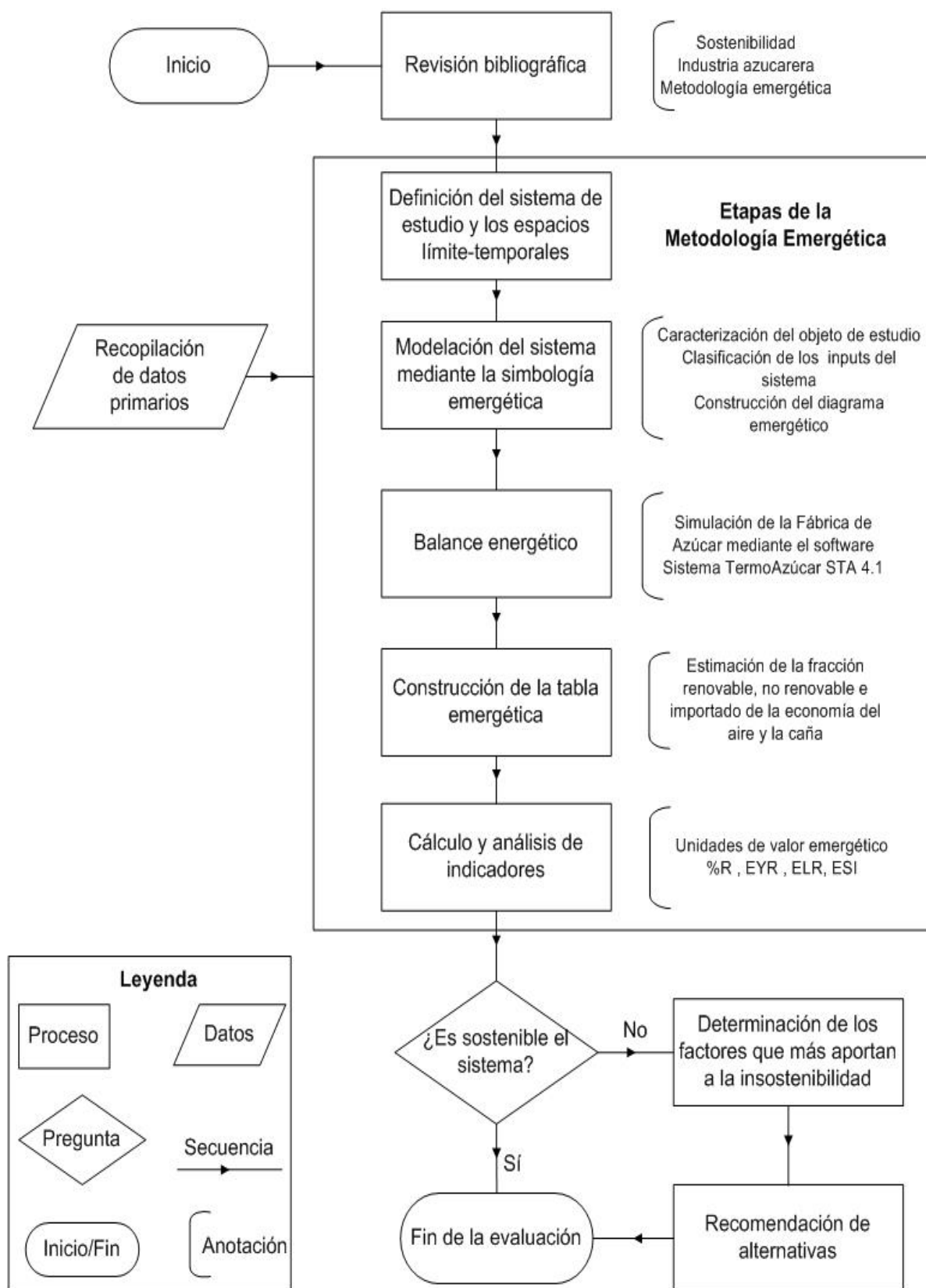


Figura 2.3. Algoritmo seguido durante la investigación. **Fuente.** Elaboración propia.

2.2.1 Límites espacio-temporales del sistema

Los sistemas termodinámicos son definidos como cualquier región espacial dentro de un límite prescrito seleccionado para su estudio. A su vez, el estudio debe ser establecido para un tiempo determinado puesto que este es un factor que define los flujos que atraviesan el sistema. Entonces, en esta etapa lo que se precisa es cuál es el objeto de análisis y durante qué período de tiempo se realizará la valoración. El no establecer adecuadamente estas variables puede llevar a la incertidumbre cualquier resultado debido a los errores en cuantificación de insumos que consume el sistema y productos que proporciona.

2.2.2 Modelación emergética

La modelación emergética consiste en la representación, a través de diagramas de flujos de materia y energía utilizando la simbología emergética, de la interacción entre las fuentes externas e internas del sistema, los sistemas productivos naturales y antrópicos, así como los flujos de salida del sistema y la retroalimentación del mismo (Lomas, P., ; Di Donato, M. y Ulgiati, S., 2007). Los componentes de los diagramas pueden ser de naturaleza físicas o propiedades como la información que, aunque usualmente es considerada intangible, requiere pequeñas energías para su almacenamiento y operación. Los flujos e interacciones pueden ser físicos como corrientes materiales, pero también de otro tipo como programas lógicos o mecanismos de control (Campbell, D., E., Brandt-Williams, S., L. and Meisch, M., E., 2005).

Este paso, como se ha comentado, tiene una gran importancia, ya que organiza y agrupa los datos disponibles, lo que permite determinar los flujos e interacciones en el sistema, poniendo en evidencia los más relevantes así como posibles vacíos de información. La escala y el grado de detalle pueden variar en dependencia de los objetivos y del tipo de socioecosistema. De la realización de un diagrama adecuado depende la bondad de los resultados (Lomas, P., y col., 2006).

El modelado se compone de los siguientes pasos (Lomas, P., 2009):

- a) A partir de los límites del sistema se definen las principales entradas y salidas de energía del mismo y se clasifican según su naturaleza (biogeofísica, económica, humana, etc.), de izquierda a derecha en orden de transformidad creciente alrededor del símbolo de límites del sistema.

- b) Se definen los componentes internos del sistema y sus relaciones tanto con las entradas y salidas de materia y energía como entre ellos, teniendo cuidado de implicar todos los elementos del sistema que regulan los procesos que constituyen el funcionamiento del mismo. Se colocan bajo el mismo criterio que en el anterior punto.
- c) Se incluyen los flujos de dinero correspondiente al uso económico que puedan tener algunos flujos del sistema, así como las entradas de dinero que mueven algunos de los componentes socio-económicos del mismo.
- d) Se incluye la degradación correspondiente a la segunda ley de la termodinámica.
- e) Se simplifica el diagrama según los objetivos del estudio mediante una agregación de categorías al nivel de detalle que se quiera llevar a cabo.

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 2.4 se pueden ver resumidos estos símbolos y a continuación se explicará brevemente su significado.

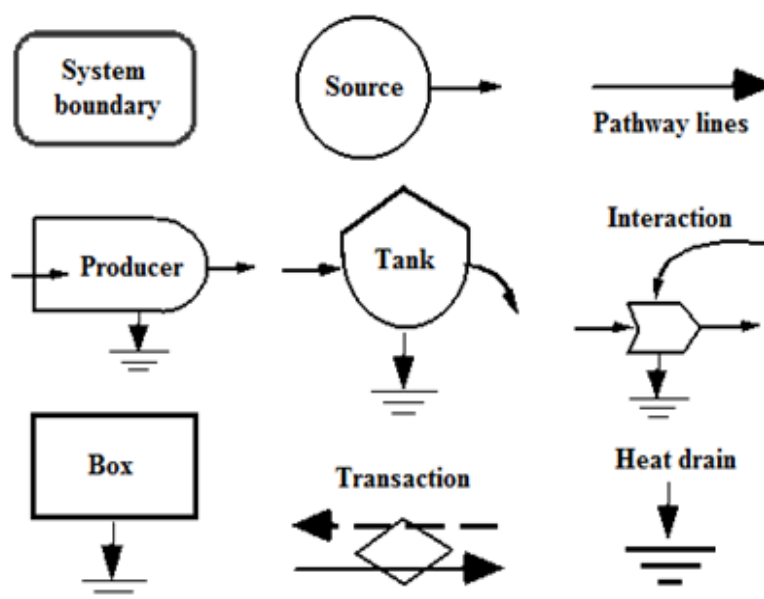


Figura 2.4. Símbolos usados en este trabajo. **Fuente.** Elaboración propia.

Límites del sistema: Los límites del sistema se representan mediante una caja rectangular. En su interior se encuentran los diferentes subsistemas objetos de estudio, así como las relaciones que se establecen entre estos. Este determina la escala espacio-temporal del análisis realizado.

Fuentes: Se entiende como tales los “focos” ubicados fuera de los límites de sistema, y de los que parten flujos de materia y energía al interior del mismo. Se ordenan en el sistema de izquierda a derecha en orden creciente de transformidad o calidad energética. Las fuentes de tipo ambiental se ubican en la zona izquierda (sol, viento, mareas, olas, etc.) y las socioeconómicas (servicios, información, etc.) en la parte derecha (Lomas, P., 2009).

Líneas de flujo: Las líneas corresponden a las corrientes de flujos energéticos, materiales de información, etc.

Depósitos: Representa el almacenamiento de energía y/o materiales para ser luego usados en el proceso.

Interacción: Este símbolo relaciona dos o más flujos que interactúan antes de ser usados en el proceso. Los flujos son conectados de izquierda a derecha en orden de sus transformidades, el de menor calidad se conecta por la izquierda y los demás por la parte superior ((Campbell, D., E., Brandt-Williams, S., L. and Meisch, M., E., 2005).

Caja: Símbolo misceláneo usado para cualquier unidad o función sin mostrar todo su proceso interno, por ejemplo procesos industriales (Brown, M., T. et al., 1999).

Transacción: En este símbolo se representa la venta de bienes o servicios (línea sólida) y el pago de dinero que es recibido por esto (línea discontinua).

Productor: Unidad productora que a partir de varias entradas concentra la energía para aumentar su calidad. En este trabajo se usó este símbolo para modelar el bloque de cogeneración, aunque para esto pudo ser usado también el símbolo de caja (box). Se decidió así porque en el bloque de cogeneración esencialmente se produce energía eléctrica a partir del bagazo.

Degradación energética: Este símbolo incorpora la degradación de energía en forma de calor que ocurre a causa de la segunda ley de la termodinámica en todos los procesos de transformación. Se ubica en la parte inferior del diagrama y es obligatorio.

2.2.3 Balance energético del sistema

Dada la complejidad de realizar este procedimiento manualmente para efectuar el balance energético de la fábrica se utilizó el simulador Sistema TermoAzúcar STA 4.1. Este es una versión docente limitada del STA 4.0 empleada en actividades docentes de pre y postgrado. El software permite la evaluación de los sistemas termoenergéticos (STE) en fábricas de azúcar crudo. Tiene la característica de operar principalmente con modelos del tipo determinista donde se asumen condiciones de estado estacionario. Es del tipo modular pero no secuencial excepto en el cálculo de lazos iterativos. Además, el software 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 2.5.

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).

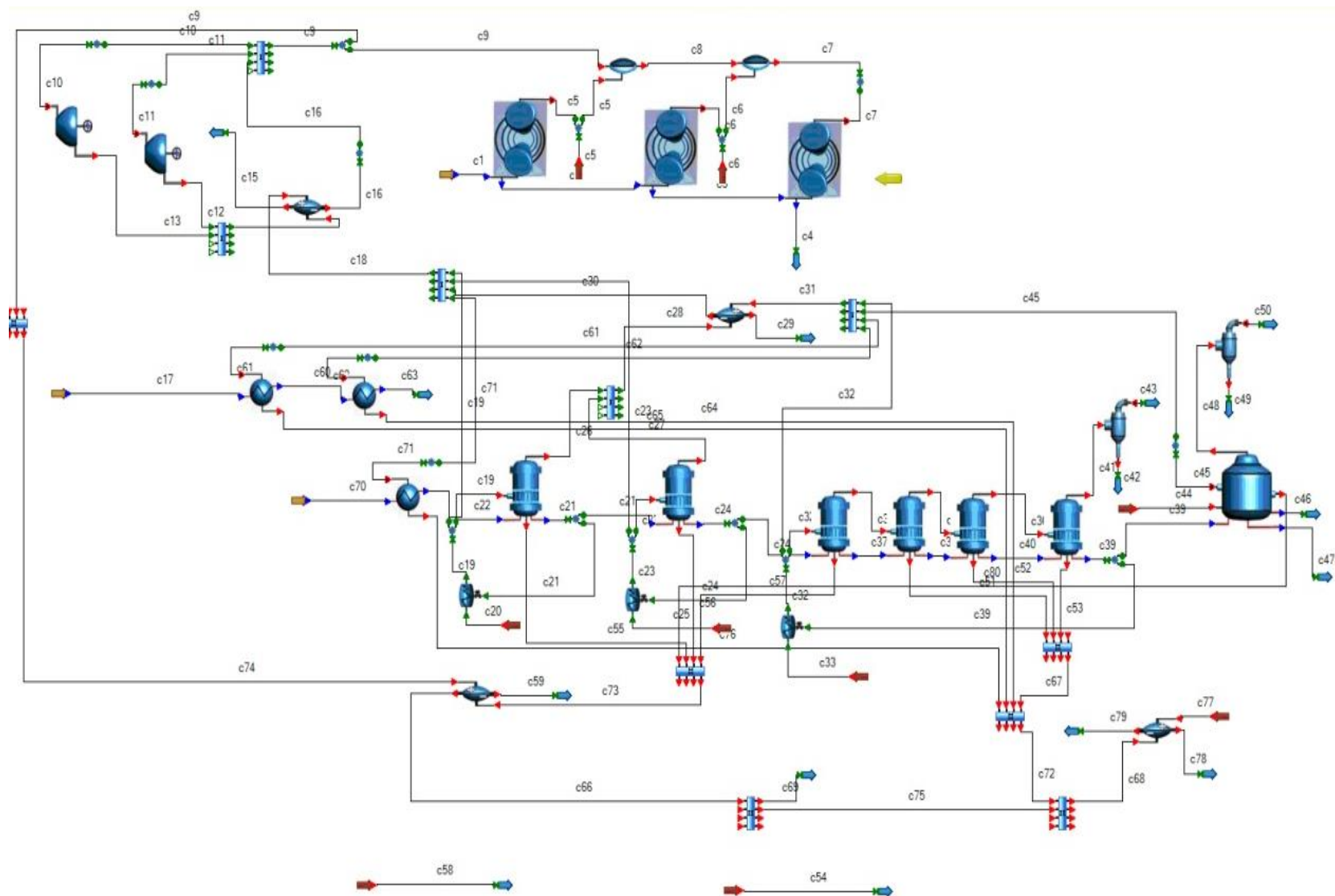


Figura 2.5. Diagrama de Flujo de Información (DFI) del proceso. **Fuente.** (Álvarez, 2016).

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 2.1.

$$Electricidad \left(\frac{J}{año} \right) = \frac{kWh}{t \text{ de caña}} \cdot \frac{t \text{ caña}}{año} \cdot \frac{3.6 \cdot 10^6 J}{kWh} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

La mayoría de los estudios emergéticos reportan las unidades de valor emergético (UEV) para los flujos másicos en emJ/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 2.2.

$$Flujo \left(\frac{g}{año} \right) = \frac{\% \text{ flujo másico en caña}}{100} \cdot \frac{t \text{ caña}}{año} \cdot \frac{10^6 g}{1 t} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Para determinar el aire necesario para quemar el bagazo se evaluó primero la cantidad de bagazo consumido ya que se sabe el bagazo disponible ($B_{\text{disponible}}$) y sobrante (B_{sobrante}) en

la fábrica expresado cómo % flujo másico en caña. El procedimiento se expresa en la ecuación 2.3.

$$Bagazo \left(\frac{kg}{año} \right) = \frac{(B_{disponible} - B_{sobrante})}{100} \cdot \frac{t \text{ caña}}{año} \cdot \frac{10^3 kg}{1 t} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

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 2.4.

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

	Seco, libre de cenizas en %	Húmedo, como se quema 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

$$W_{at} \left(\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}} \right) = 11.5 \cdot C + 34.5 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4.32 \cdot S \quad \text{Ecuación 2.4}$$

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 2.5.

$$\text{Aire} \left(\frac{kg}{año} \right) = 1.15 \cdot \text{Bagazo quemado} \cdot W_{at} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Los principales sumideros de energía del proceso son: el condensador barométrico, los residuales y los gases de combustión. Se pierde energía además en los equipos debido a la transferencia de calor por radiación, así como a que en estos la conversión de energía en trabajo nunca es del 100% debido a la segunda ley de la termodinámica. La determinación de todas las pérdidas de energía del sistema es prácticamente imposible por lo que se estimaron solo aquellas de las que el software brinda información. Estas fueron debido a: vapor expulsado a la atmósfera, sobrante de condensados puros, pérdidas de calor por evaporación al condensador barométrico y pérdidas de calor por evaporación en tachos al condensador barométricos.

Según la representación del DFI las pérdidas por el vapor expulsado a la atmósfera es aquella correspondiente a las corriente c29, los sobrantes de condensados puros c66, por evaporación del último vaso del múltiple efecto hacia el condensador c41 y por evaporación de tachos a condensador barométrico c48. En la Tabla 2.3 aparecen las características de estas corrientes. La entalpía de cada corriente fue estimada con el software SteamTab conociéndose la temperatura de cada corriente por datos del simulador. Entonces por la ecuación 2.6 se evaluaron las pérdidas de energía de cada corriente.

Tabla 2.3. Características de las corrientes a sumidero de energía. **Fuente.** Elaboración propia.

Corriente	Temperatura [K]	Flujo [% másico en caña]	Entalpía [kJ/kg]
c29	389,42	8,80	2700,46
c66	398,16	2,91	525,116
c41	329,14	10,4	2601,83
c48	327,10	15,62	2598,25

$$\text{Pérdidas} \left(\frac{J}{año} \right) = \frac{\text{flujo}(\%)}{100} \cdot \frac{t \text{ caña}}{año} \cdot \frac{10^3 kg}{1 t} \cdot \text{Entalpía} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot \frac{10^3 J}{1 kJ} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Hay que añadir que, como el software realiza la simulación en estado estacionario, este no determina los consumos de electricidad por arranques y paradas. Para su cálculo se asumió el indicador de electricidad consumida del SEN/ t de caña reportado por el Laboratorio de Análisis de la UEB Fábrica de Azúcar 14 de Julio para el año analizado. Este indicador posee unidades de kWh/t de caña por lo que el cálculo del consumo de electricidad importada se realizó mediante la ecuación 2.1. Igual situación se presentó con la producción de cachaza, reportada en la fábrica en unidades de % flujo másico en caña. Entonces, para su cálculo se empleó la ecuación 2.2.

2.2.4 Construcción de la tabla emergética

Una vez determinado el balance energético del sistema se procedió a la construcción de la tabla emergética. Usualmente esta tiene siete columnas como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Ejemplo típico de una tabla emergética. **Fuente.** (Lomas, P., 2009).

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (em\$/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	$\frac{\sum_n Em_i}{xx.x}$	$\sum_n Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n Em_i}{PIB}$

La columna 1 “nota” se refiere al orden en que cada uno de los flujos está colocado, así como al orden de la nota a pie de tabla en la que se refiere el origen del dato y los cálculos realizados para su transformación a las unidades correspondientes. La columna 2 se refiere al nombre del flujo evaluado. La columna 3 es la cifra proporcionada por los cálculos elaborados para cada flujo, que figuran numerados al pie de la tabla, en sus unidades correspondientes, que se encuentran en la columna 4. La columna 5 se refiere a la emergencia por unidad (transformidad o energía específica), que transforma las cifras de la columna 3, en las cifras de la columna 6, que ya son referidas a emergencia solar. Por último, la columna 7 se refiere al denominado valor macroeconómico, o cantidad de actividad económica que se mueve debido a un determinado flujo o reserva de emergencia y que se calcula dividiendo su

emergía por la cantidad de actividad económica media movida por el total de emergencia del sistema o relación emergencia-dinero. Las últimas filas se reservan para los productos del sistema (exportaciones, población, productos monetarios, etc.) y los cálculos relativos a su transformidad, emergencia total, etc. (Lomas, P., ; Di Donato, M. y Ulgiati, S., 2007)

Los valores de los servicios adquiridos de la economía se tomaron del software “VerSat”, usado en el Departamento de Economía de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. Sin embargo, dados los pocos estudios emergéticos que hay en Cuba y la incertidumbre que introduce el uso de dos monedas en el país no se desarrolló el análisis del valor macroeconómico. Hay que destacar además que como se asumió la transformidad de la *National Environmental Accounting Database* (NEAD) para los flujos monetarios considerados, estos fueron llevados a moneda convertible (CUC) dada su equivalencia en el país al dólar norteamericano.

Para una mayor comodidad los valores de los productos, sus transformidades y emergencias específicas fueron representados en otra tabla. En la tabla emergética se agruparon los recursos naturales renovables (R) y no renovables (N), así como los adquiridos de la economía (F) para el posterior cálculo de indicadores. 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) se usaron las ecuaciones 2.7-2.13:

$$R = \sum_{i=1}^n \text{Recursos renovables} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$N = \sum_{i=1}^n \text{Recursos no renovables} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$I = R + N \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Materiales de la economía} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$S = \sum_{i=1}^n \text{Servicios de la economía} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$F = M + S$$

$$\text{Ecuación 2.12}$$

$$Y = I + F$$

$$\text{Ecuación 2.13}$$

El aire atmosférico tiene una composición volumétrica de 20,99 % de oxígeno, 78,03 % de nitrógeno, poco menos de 1 % de argón y pequeñas cantidades de varios gases inertes, como vapor de agua, dióxido de carbono, helio e hidrógeno. Para cálculos de ingeniería es por lo general suficientemente exacto incluir todos los gases inertes en el nitrógeno y usar en el análisis 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Así pues, en 100 kmoles de aire hay aproximadamente 21 kmoles de O₂ y 79 kmoles de N₂, o sea la relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire es 3,76 kmol N₂/ kmol O₂. 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 (Moring, 2006).

De acuerdo a lo anterior este flujo se separó considerando que parte del aire 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 2.14.

$$f_{Aire_N} = \frac{0.231 \cdot Bagazo quemado \cdot W_{at}}{1.15 \cdot Bagazo quemado \cdot W_{at}} \approx 0.201 \quad \text{Ecuación 2.14}$$

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 (C_p) es 1,007 kJ/kg (Incropera, 2007), por lo que el del flujo de aire que entra al proceso se calculó según la ecuación 2.15. Entonces las fracciones renovables y no renovables fueron calculadas por las ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente.

$$Aire \left(\frac{J}{año} \right) = \left[Aire \left(\frac{kg}{año} \right) \cdot C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot T(K) \right] \cdot \frac{1000 J}{1kJ} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$Aire_R \left(\frac{J}{año} \right) = 0.799 \cdot Aire \left(\frac{J}{año} \right) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

$$Aire_N \left(\frac{J}{año} \right) = 0.201 \cdot Aire \left(\frac{J}{año} \right) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

En el caso del recurso caña se consideró la fracción renovable [R], no renovable [N] e importado de la economía [F] necesaria para su producción en las zonas que tributan a la fábrica de azúcar. En la Figura 2.6 aparece la relación porcentual de estas categorías. Por tanto, el flujo de caña molida se dividió entre estas categorías multiplicando las relaciones porcentuales por el flujo de caña a moler como se representa en las ecuaciones 2.18-2.20.

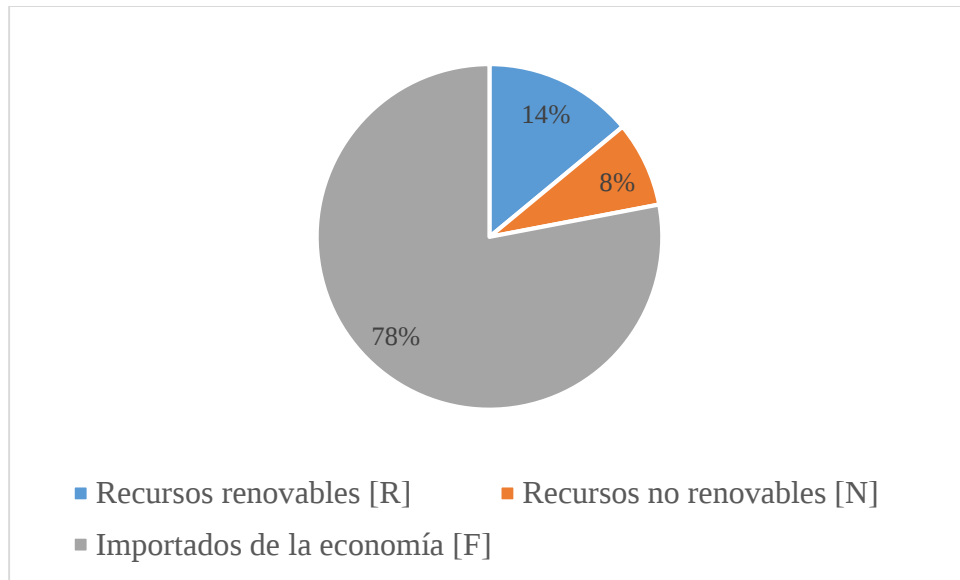


Figura 2.6. Relación porcentual de los recursos para la producción de la caña de azúcar.
Fuente. (Abreu, 2017).

$$Caña_R \left(\frac{g}{año} \right) = 0,14 \cdot Caña \left(\frac{g}{año} \right) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$Caña_N \left(\frac{g}{año} \right) = 0,08 \cdot Caña \left(\frac{g}{año} \right) \quad \text{Ecuación 2.19}$$

$$Caña_F \left(\frac{g}{año} \right) = 0,78 \cdot Caña \left(\frac{g}{año} \right) \quad \text{Ecuación 2.20}$$

Las principales corrientes de materiales adquiridos de la economía fueron los productos químicos para el proceso: cal, floculante, ácido clorhídrico, sosa cáustica, soda ash, fosfato trisódico y alcohol absoluto y otros materiales como: sacos para envase, gases industriales, neumáticos, cámaras y otros accesorios. Los servicios adquiridos de la economía

comprenden a los gastos por transporte y almacenaje, energía eléctrica comprada, otros servicios y la labor humana.

La labor humana en el año fue estimada por los datos del departamento de economía. A partir de que los obreros de la fábrica trabajaron 987 948 horas en un promedio de 8 horas al día, que una persona consume 2 500 kcal de energía metabolizada/día y considerando el factor de conversión señalado en el acápite 1.3.1 se calculó la labor humana mediante la ecuación 2.21.

$$Labor \left(\frac{J}{año} \right) = \left(\frac{obreros\ h}{año} / 8 \frac{obrero\ h}{día} \right) \cdot 2500 \frac{kcal}{día} \cdot 4186 \frac{J}{kcal} \quad Ecuación\ 2.21$$

Por último, en el caso de algunas transformidades y UEV hubo que cambiar la referencia de base emergética de 9,24 E24 seJ/año a 15,83 E24 seJ/año. Esto sucede debido a que en los estudios emergéticos fue usada la primera base hasta que se actualizó con la segunda estimación pero el incremento de la base emergética global cambia los UEV que directa e indirectamente son derivados del valor global de empoder anual (Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c). Entonces para usar estas transformidades hay que multiplicarlas por el coeficiente 1,68.

2.2.5 Cálculo y análisis de los indicadores emergéticos

Como ha sido establecido anteriormente el análisis emergético clasifica las entradas a un sistema en recursos renovables (R), no renovables (N) e importados de la economía (F). Esto establece una relación funcional de la emergía con la energía, el medio ambiente y la economía. Esto permite el cálculo de una serie de índices que nos brinda información sobre diversas características del sistema, permite establecer comparaciones entre varios escenarios para el manejo del mismo, así como la comparación entre diversos sistemas. Por tanto, sirven de apoyo para la gestión y evaluación de la sostenibilidad dentro de los criterios del método. Los indicadores usados en este trabajo y la manera de calcularlos e interpretarlos 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. Puede interpretarse como el valor inverso de la eficiencia de un agroecosistema (Aguilar, N., Rosas, J. y Espinosa, R., 2015). En la ecuación 2.22 se muestra su cálculo.

$$Tr = \frac{Y}{E_p} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

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. Los elementos y compuestos poco abundantes en la naturaleza por consiguiente tienen una emergía específica mayor cuando se encuentran concentrados dado que más trabajo fue requerido para concentrarlos, espacial y químicamente (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004). 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 2.23.

$$Em = \frac{Y}{P} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

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 de 27 °C se estimó por la ecuación 2.24 (Rein, 2012). Luego dividiendo su emergía específica por este valor se obtiene su transformidad (ecuación 2.25).

$$h_s \left(\frac{J}{g} \right) = 1.1702 \cdot t + 0.001707 \cdot t^2 \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$T_{azúcar} \left(\frac{seJ}{J} \right) = \frac{Em_{azúcar} \left(\frac{seJ}{g} \right)}{h_s \left(\frac{J}{g} \right)} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

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). Mientras mayor sea este indicador más sustentable es el sistema a largo plazo puesto que depende en menor medida de los recursos no renovables e importados de la economía. O sea, el medio ambiente debe ser capaz de

reponer los recursos necesarios para la continuidad del proceso. Su cálculo se lleva a cabo mediante la ecuación 2.26.

$$\%R = \left(\frac{R}{Y}\right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2.26}$$

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

La razón de eficiencia energética (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 energéticos 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, M., T. and Ulgiati, S., 2004). La ecuación 2.27 muestra la manera de calcular este índice.

$$EYR = \frac{R + N + F}{F} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

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 energético, 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). Mientras mayor sea este índice mayor será la distancia del desarrollo de los procesos naturales que pueden ser logrados localmente. En cierta medida, el ELR es una medida de la perturbación a la dinámica medioambiental local, generada por el desarrollo conducido por el exterior. El ELR claramente establece una diferencia entre recursos renovables y no renovables así que complementa la información provista por la transformidad (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 1997). Para su cálculo se utiliza la ecuación 2.28.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Los valores bajos de ELR indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental. Cuando el $ELR > 10$ hay una alta carga ambiental y cuando el $3 < ELR < 10$ el impacto es considerado moderado. Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos (Gálvez, 2016).

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, M., T. and Ulgiati, S., 2004). Este índice se determina usando la ecuación 2.29.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

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 el $ESI < 1$ el proceso no es sustentable a largo plazo y cuando $1 < ESI < 5$ se contribuye moderadamente a la economía. Un $ESI > 5$ indica que el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo, sin embargo es incorrecto pensar que mientras mayor sea este indicador mayor su sostenibilidad dado que cuando el $ESI > 10$ se considera como subdesarrollado el proceso (Cano, A., Gallego, D. and Velásquez, H., 2014).

En la Tabla 2.5 se resumen los indicadores previamente explicados y su interpretación respecto a la sostenibilidad del proceso. Hay que destacar que, aunque existen rangos para cada indicador en aras de describir el sistema, es recomendable realizar el análisis conjunto de la información proporcionada por estos.

Tabla 2.5. Interpretación respecto a la sostenibilidad de los indicadores analizados. **Fuente.** Elaboración propia.

Indicador	Interpretación respecto a la sostenibilidad
Transformidad (Tr) y energía específica (Em)	Mientras menor sea la transformidad o la energía específica menos invierte el sistema para producir los productos y más sostenible
Razón de renovabilidad (%R)	A largo plazo solo sistemas con un alto valor son sostenibles
Razón de eficiencia energética (EYR)	Es deseable que posea un valor alto ($EYR > 2$) pero de ser muy elevado puede significar una explotación excesiva de recursos naturales
Razón de carga ambiental (ELR)	Valores bajos indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental
Índice de sostenibilidad energética (ESI)	Cuando $1 < ESI < 5$ se contribuye moderadamente a la economía y un $ESI > 5$ indica que el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo aunque cuando el $ESI > 10$ se considera el proceso como subdesarrollado

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los principales resultados de la investigación acordes a la metodología declarada en el capítulo anterior. Se explican los límites espacio-temporales, el diagrama emergético para el sistema en análisis, los resultados de la simulación y la tabla e indicadores emergéticos. Se analizan los indicadores obtenidos comparándolos con valores reportados por la literatura para este tipo de sistema. Finalmente se identifican cuáles son los factores que más aportan a los resultados y se recomiendan posibles alternativas a valorar para mejorar los indicadores obtenidos.

3.1 Límites espacio-temporales del estudio

El sistema objeto de estudio fue la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio” constituido principalmente por el proceso de fabricación de azúcar y el bloque de cogeneración. Por consiguiente, las corrientes principales de entrada al proceso fueron: caña de azúcar, agua, productos químicos, materiales para el proceso, aire, labor humana y 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 y se generará miel y cachaza, así como residuales.

Se eligió entre todas las fábricas de azúcar de la provincia de Cienfuegos la UEB “14 de Julio” puesto que ha continuado en operación durante décadas, moliendo incluso cuando otros centrales tuvieron que parar. Además, por sus resultados obtenidos en los últimos años ha sido condecorado con la insignia de Vanguardia Nacional. De esta manera se sigue la recomendación propuesta por Odum: “Para estimar la mejor posible producción, la transformidad es buscada en sistemas que han sido largamente probados, mejorados por opciones selectivas y que operan probablemente a la mejor eficiencia consistente con el principio de máxima potencia emergética” (Odum, H., T., 1996).

Como aparentemente todos los sistemas pulsan en intervalos de tiempo y la intensidad de los pulsos incrementan con la escala, para evaluar un proceso en una escala de tiempo y espacio usualmente se usa los valores promedio para las corrientes de menor escala donde los pulsos son más frecuentes. Por ejemplo, para la evaluación del fenómeno de la

economía humana los promedios anuales son apropiados. El resultado es una evaluación emergética como si el sistema estuviera en estado estacionario (Odum, H., T, Brown, M., T. and Brandt-Williams, S., 2000c).

En concordancia con esta observación los datos adquiridos para este estudio están referidos a valores promedio del reporte de zafra para el período 2014/2015 proporcionados por el Laboratorio de Análisis de la entidad. En el Anexo 7 se puede ver parte del reporte de zafra para dicho período.

3.2 Modelación del sistema

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 y la caña, como se explicó en el acápite 2.2.4, se estimó la fracción renovable, no renovable e importados de la economía de estos. En la Tabla 3.1 se muestran los flujos de estas corrientes y su correspondiente clasificación.

Tabla 3.1. Clasificación de los principales *inputs* del sistema. **Fuente.** Elaboración propia

Nombre	Flujo	Unidades/año	Clasificación
Aire	2,3742 E+11	kg	R
Caña	5,6184 E+04	t	R
Aire	5,9728 E+10	kg	N
Agua	1,2009 E+05	t	N
Caña	3,2105 E+04	t	N
Caña	3,1302 E+05	t	M
Cal	3,5615E+05	kg	M
Ácido clorhídrico	1,6281E+04	kg	M
Sosa cáustica	1,6500E+04	kg	M
Soda ash	1,8000E+03	kg	M
Fosfato trisódico	1,9000E+03	kg	M
Alcohol	3,5539E+03	L	M
Floculante	1,4632E+03	\$	M
Otros materiales	7,2256E+04	\$	M
Servicios	6,8203 E+04	\$	S
Electricidad importada	5,5381 E+05	kWh	S
Labor humana	1,2924E+12	J	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.

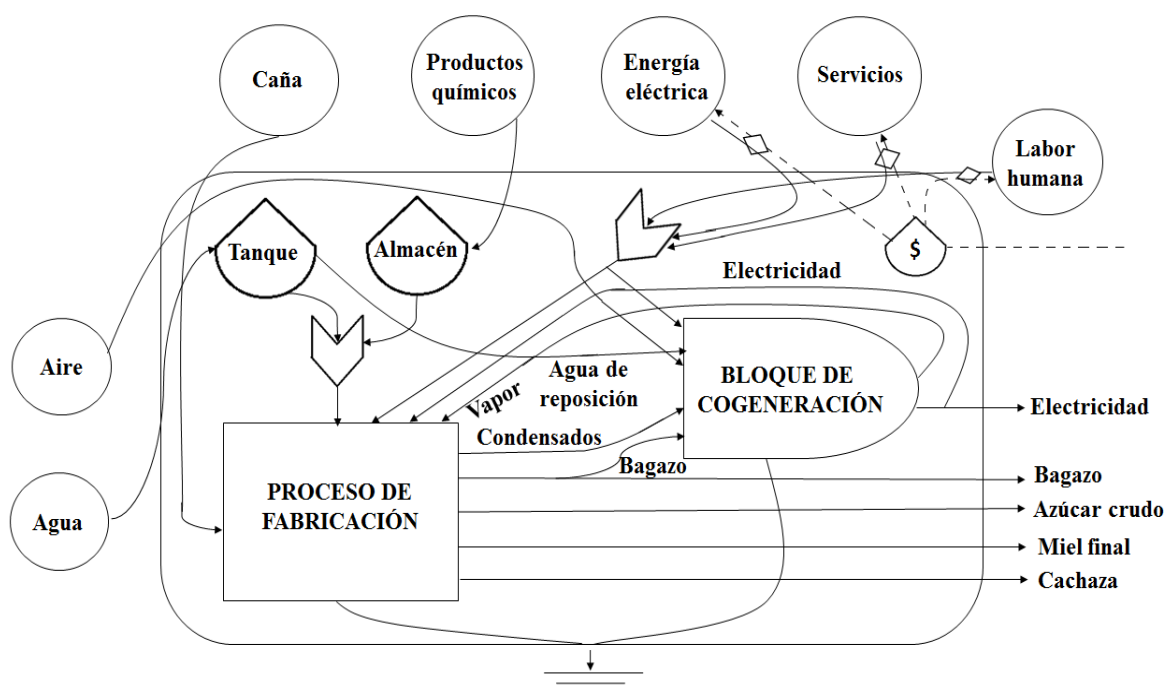


Figura 3.1. Diagrama emergético de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. **Fuente.** Elaboración propia.

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 como del proceso de fabricación sale el bagazo hacia el bloque de fabricación lo que permite el autoabastecimiento energético en forma de electricidad y vapor. Sin embargo, aun así, es necesario importar electricidad desde el exterior del sistema. Se emplean además los condensados puros para un uso más racional del agua, pero esta no es suficiente para los requerimientos de la cogeneración por lo que es necesario reponer el déficit. Por último, los productos químicos se diluyen en agua para lograr una homogeneidad en la dosificación; tal es el caso de la lechada de cal formada a partir de la cal y el agua, aunque hay que destacar que esto no es así para todos los productos químicos.

3.2 Resultados del balance energético

En la Tabla 3.2 aparecen los indicadores seleccionados del TermoAzúcar mientras que en el Anexo 8 se pueden observar todos los indicadores y reportes de corrientes del software. El balance obtenido merece las consideraciones que se exponen a continuación.

Tabla 3.2. Resultados de la simulación. **Fuente.** Elaboración propia.

INDICADORES	VALOR	UNIDADES
Producción eléctrica específica de la fábrica	43,14	kWh/t de caña
Demanda eléctrica específica de la fábrica	29,01	kWh/t de caña
Electricidad vendida al SEN	14,13	kWh/t de caña
Rendimiento industrial	11,61	%
Tasa de evaporación del múltiple efecto	26,61	kg/h·m ²
Economía del área de evaporación	1,89	adimensional
Pérdidas calor evaporación al condensador barométrico del múltiple efecto	23,16	% demanda de escape del proceso
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de casa de calderas	28,88	% demanda de escape del proceso
Bagazo disponible	31,7	% flujo másico en caña
Bagazo sobrante	6,6	% flujo másico en caña
Miel final	3,95	% flujo másico en caña
Azúcar producida	11,61	% 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 Fábrica de Azúcar “14 de Julio” la potencia nominal instalada es de 6,5 MW, pero solo se está generando 5,39 MW para una producción específica de 43,14 kWh/t de caña. Se puede concluir que solo se está aprovechando el 83 % de la capacidad nominal instalada por lo que existe la posibilidad de generar más electricidad. La demanda eléctrica específica de la fábrica fue de 29,01 kWh/t de caña que está acorde a los valores reportados, este indicador varía entre 15-32 kWh/t de caña (Victoria, 2009) y 20-35 kWh/t de caña (Rein, 2012).

Por otra parte, para la molida considerada en el estudio de 401 312,23 t de caña /año el sistema aporta al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) 5 670 541,81 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. Considerando la electricidad consumida del SEN, reportada en la Tabla 3.1 y asumiendo que 1 t equivalente de petróleo equivale a 11 630 kWh se puede calcular que el ahorro de combustible sería de aproximadamente de 440 t de petróleo/año.

Rendimiento Industrial

El rendimiento industrial obtenido fue de 11,61 %. Esto representa que por cada 100 t de caña molida se obtienen 11,61 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 ejemplo, se estima que por cada 1 % de materia extraña que entra a la fábrica se pierden 1,5 kg de azúcar por tonelada de caña procesada. Esto se evidencia en la Figura 3.2 donde aparecen tabulados el rendimiento y contenido de materias extrañas para las últimas 11 zafas de la fábrica. Se destacan especialmente la zafra atípica del 2015/16 en el que el rendimiento bajó abruptamente y la del año 2005 en el que el rendimiento fue el mayor de todas.

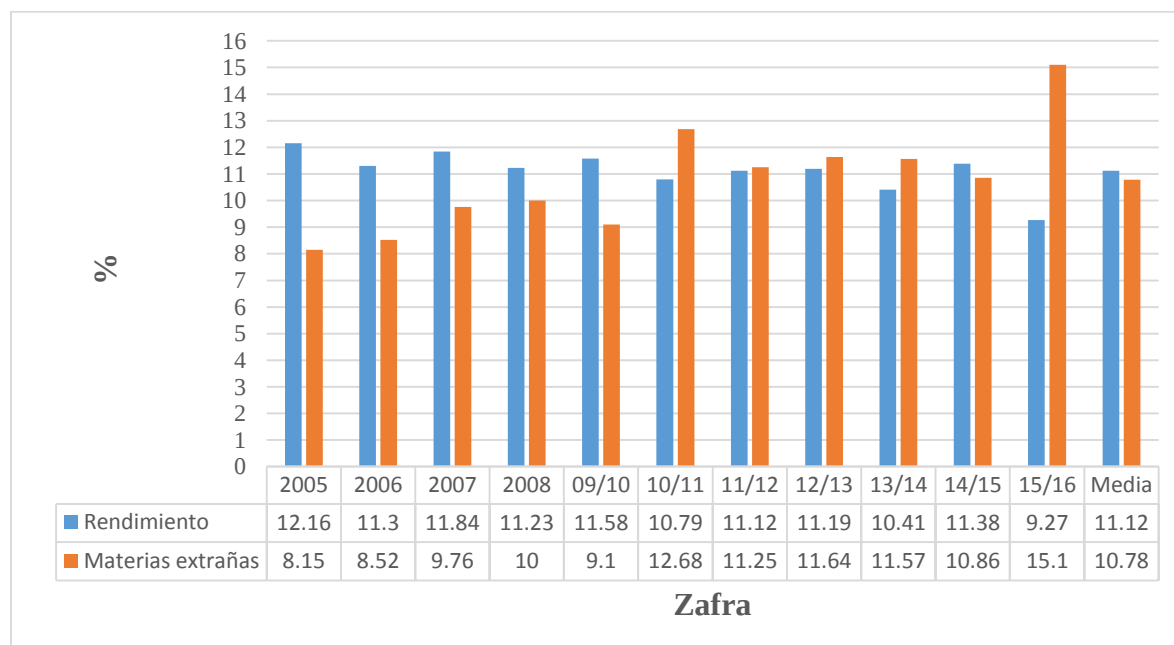


Figura 3.2. Relación entre el rendimiento y el contenido de materias extrañas. **Fuente.** Laboratorio de Análisis de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.

Por consiguiente, es necesario sensibilizar a los productores cañeros de la repercusión de este parámetro 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.

Área de evaporación

La tasa de evaporación calculada para el múltiple efecto fue de $26,61 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ 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 representando aproximadamente el 83 % del vapor de escape. 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 1,89 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 como se señaló anteriormente. No obstante, otros factores que pueden afectar la eficiencia (Rein, 2012) y deben comprobarse son:

- Condensados no evacuados adecuadamente de la calandria, lo que puede deberse a trampas de vapor bloqueadas o a tuberías subdimensionadas.
- Los gases incondensables no se desfogan (ventean) adecuadamente desde toda el área de la calandria, o algunas de las descargas se encuentran bloqueadas o resultan ser inadecuadamente pequeñas.
- Fugas en la calandria, sea a la entrada de aire a la calandria, o el escape de condensado o vapor al espacio del jugo hirviente.

- Caída de presión excesiva entre el espacio de vapor en un cuerpo y la calandria del siguiente cuerpo. Esto puede ser causado por taponamientos del separador de arrastres, tuberías de vapor subdiseñadas o por la presencia de algún elemento en la línea que cause obstrucción del flujo.
- Deficiencias en la ubicación de las entradas y salidas de jugo que causen evaporación desigual e incrustaciones localizadas.
- Uno de los cuerpos resulta sobrecargado debido a que constituye el cuello de botella del tren de evaporadores.
- El cuerpo sufre incrustaciones más severas de lo esperado debido a condiciones de proceso.
- El cuerpo no se ha limpiado adecuadamente y se encuentra parcialmente incrustado.
- Cortocircuito de líquido desde las entradas a las salidas de jugo debido a un diseño inadecuado.

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.

La pérdida de energía por el vapor expulsado a la atmósfera fue de $9,5368 \text{ E}+13 \text{ J/año}$ y por sobrante de condensados puros $6,1324 \text{ E}+12 \text{ J/año}$. La energía del vapor del último vaso del múltiple efecto al condensador barométrico fue $1,0859 \text{ E}+14 \text{ J/año}$ y por evaporación de tachos a condensadores barométricos $1,6287 \text{ E}+14 \text{ J/año}$. En la Tabla 3.2 se puede ver que estas últimas representan grandes porcentajes de la demanda de escape del proceso. El total de las pérdidas cuantificadas da un valor de $3,7296 \text{ E}+14 \text{ J/año}$, aunque como se explicó en el capítulo dos no se pudo contabilizar las pérdidas de energía en los gases de combustión ni residuales, por lo que el valor real es considerablemente mayor.

Por último, se determinó que para la simulación realizada se obtienen aproximadamente 4,6592E+10 g de azúcar, 2,6487E+10 g de bagazo sobrante, 1,5852E+10 g de miel final, 1,4246 E+10 g de cachaza y 2,0414E+13 J de electricidad, todos referidos a una zafra. Estos valores representan los productos y co-productos del sistema.

3.3 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 3.3 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 Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.

Tabla 3.3. Unidades de valor emergético usadas en el estudio. **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)
Caña	3,81E+08	seJ/g	(Abreu, 2017)
Cal	9,50E+09	seJ/g	(De-Vilbiss, C. and Brown, M., T., 2015)
Ácido clorhídrico *	3,64E+09	seJ/g	(Jarméus, 2013)
Sosa cáustica *	1,90E+09	seJ/g	(Jarméus, 2013)
Soda ash	1,07E+09	seJ/g	(Simoncini, E. et al., 2009)
Fosfato trisódico	9,35E+09	seJ/g	(Giannetti, B., F. et al., 2016)
Alcohol	1,10E+12	seJ/L	(Lima, C. and Ortega, E., 2009)
Valores monetarios	4,60E+12	seJ/\$	(Sweeney, S. et al., 2007)
Electricidad	3,40 E+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 (Tabla 3.1) y sus transformidades (Tabla 3.3) se procedió a la construcción de la tabla emergética para el sistema objeto de estudio (Tabla 3.4). Hay que destacar que previamente fue necesario realizar un análisis dimensional para evitar incongruencias al determinar la emergía de cada ítem mediante la ecuación 1.3.

Tabla 3.4. Tabla emergética para la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”. **Fuente.** Elaboración propia.

Nota	Ítem	Dato	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
Recursos renovables de la naturaleza [R]					9,2459E+19
1	Aire	7,1726E+16	J/año	9,8200E+02	7,0435E+19
2	Caña	5,6184E+10	g/año	3,9200E+08	2,2024E+19
Recursos no renovables de la naturaleza [N]					3,0369E+19
3	Aire	1,8044E+16	J/año	9,8200E+02	1,7719E+19
4	Agua	1,2009E+11	g/año	5,4264E+05	6,5165E+16
5	Caña	3,2105E+10	g/año	3,9200E+08	1,2585E+19
Materiales de la economía [M]					1,2405E+20
4	Caña	3,1302E+11	g/año	3,9200E+08	1,2271E+20
5	Cal	3,5615E+08	g/año	1,00E+09	3,5615E+17
6	Ácido clorhídrico	1,6281E+07	g/año	6,1152E+09	9,9564E+16
7	Sosa cáustica	1,6500E+07	g/año	3,1920E+10	5,2668E+17
8	Soda ash	1,8000E+06	g/año	1,07E+09	1,9260E+15
9	Fosfato trisódico	1,9000E+06	g/año	9,35E+09	1,7765E+16
10	Alcohol	3,5539E+03	L/año	1,10E+12	3,9093E+15
11	Floculante	1,4632E+03	\$/año	4,60E+12	6,7307E+15
12	Otros materiales	7,2256E+04	\$/año	4,60E+12	3,3238E+17
Servicios de la economía [S]					6,0706E+18
13	Transporte y almacenaje	3,7233E+03	\$/año	4,60E+12	1,7127E+16
14	Energía eléctrica comprada	1,9937E+12	J/año	3,40E+05	6,7786E+17
15	Otros gastos de la empresa	6,4480E+04	\$/año	4,60E+12	2,9661E+17
16	Labor humana	1,2924E+12	J/año	3,93E+06	5,0790E+18
Emergía total [Y]					2,5295E+20

Se destaca que los valores de las transformidades y demás unidades de valor emergético de los diferentes ítems son congruentes con el principio de que mientras más esfuerzo (transformaciones) requiere la obtención de un producto mayor será su transformidad (Anexo 2). Esto no se ve así en el caso del floculante porque fue evaluado como un flujo económico. Es recomendable siempre que sea posible calcular la emergía en función de la masa, debido a que el dinero muchas veces no representa adecuadamente una valoración de los servicios ambientales para producir un bien o servicio.

El principal flujo emergético al proceso proviene de la economía (1,3012 E+20 seJ/año) representando un 51,44 % de la emergía total mientras que el aporte de la naturaleza

(1,2283 E+20 seJ/año) representa el 48,56 %. En la Figura 3.3 se puede ver la relación porcentual de las cuatro categorías analizadas donde los materiales de la economía representan el mayor aporte energético y los servicios de la economía el menor. El bajo valor de los servicios de la economía está dado principalmente porque el sistema es capaz de producir la mayor parte de la electricidad que necesita, a diferencia de otros procesos. Además, en Cuba existe una estructura empresarial donde la fábrica no comercializa directamente el azúcar por lo que no se incurren en grandes gastos por transportación.

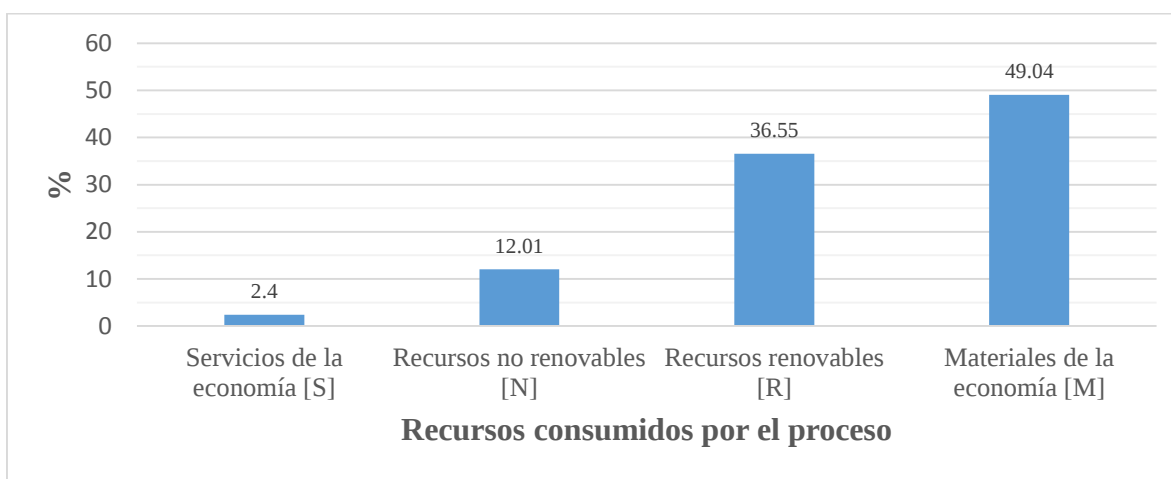


Figura 3.3. Proporción de la energía total por categoría. **Fuente.** Elaboración propia.

Es notable que la energía producto de la labor humana está en el orden de la importada como electricidad, pero como su transformidad es más elevada esta representa el 83,67 % de la energía de los servicios de la economía como se observa en la Figura 3.4. Además, a nivel de sistema, constituye el 2,01 % de la energía total lo que también es significativo

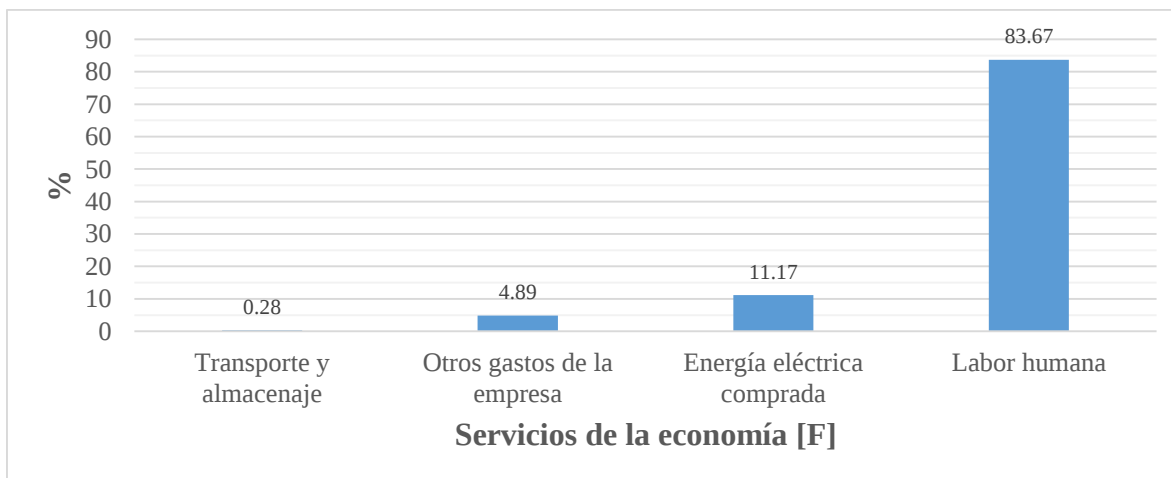


Figura 3.4. Estratificación de los servicios de la economía. **Fuente.** Elaboración propia.

Por último, uno de los recursos que a simple vista no parece revelador por su bajo aporte emergético (0,03 % de la emergencia total) es el agua. Su valor está dado porque la transformidad de este insumo no es elevada en consideración al resto de ítems analizados. Además, el objeto de estudio presenta un bajo consumo (0,3 t agua/t de caña molida) en comparación con otros procesos, debido a que la caña de azúcar contiene aproximadamente 70 % de agua, la que es empleada mediante la integración de los subprocesos del sistema.

Sin embargo, las pérdidas de energía en condensadores (Tabla 3.2) incrementan el consumo de este recurso en el sistema. Esto ya ha sido señalado anteriormente debido a que para lograr enfriar los 68 m³/h de agua proveniente de los condensadores se necesitan 160 rociadores (*sprays*) en la laguna que ocupan un área de 2600 m², lo que hace que la cantidad de agua que completa el sistema sea mucho mayor que el flujo que se necesita en el proceso tecnológico (Tirado, 2011). Por ello, emprender medidas para evitar las pérdidas de energía en los condensadores barométricos es de vital importancia dado que uno de los requisitos más importantes en la eficiencia y calidad de los procesos es una gestión adecuada del agua.

3.4 Resultados del cálculo y análisis de los indicadores emergéticos

Los productos obtenidos y sus unidades de valor emergético (UEV) se pueden ver en la Tabla 3.5. Hay que destacar que los principales productos del sistema son el azúcar crudo y la electricidad y que, aunque se consideró el bagazo, la miel final y la cachaza como co-productos, no se deben utilizar sus emergencias específicas para efectuar comparaciones debido a que todavía necesitan procesamiento para convertirse en productos útiles a la economía. A pesar de esto, conocer estos valores es un aporte significativo para posteriores investigaciones en la industria de los derivados.

Tabla 3.5. Transformidades y emergencias específicas de los productos del proceso. **Fuente.** Elaboración propia.

Producto	Producción	Transformidad (seJ/J)	Emergencia específica (seJ/g)
Azúcar (g/año)	4,6592 E+10	1,2328E+08	5,4290E+09
Bagazo (g/año)	2,6487 E+10	-	9,5501E+09
Miel final (g/año)	1,5852 E+10	-	1,5957E+10
Cachaza (g/año)	1,4246 E+10	-	1,7756E+10
Electricidad (J/año)	2,0414 E+13	1,2391E+07	-

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 lo que se evidencia según la ecuación 1.3 en su menor transformidad. En base a este resultado parece lógico preferenciar la producción de electricidad en la fábrica como un elemento imprescindible para lograr mayor eficiencia y sostenibilidad.

En la Tabla 3.6 se muestran los indicadores emergéticos del proceso. La razón de renovabilidad (%R=36,55) y la razón de eficiencia emergética (EYR=1,94) indican que el proceso explota moderadamente los recursos naturales locales. El valor próximo a dos manifiesta que, aproximadamente, por cada unidad en emergía invertida de la economía se obtiene una unidad de emergía de la naturaleza. En la Tabla 2.5 se señaló que, para considerar el sistema como tal, la razón de eficiencia emergética debía ser mayor a dos ($EYR > 2$), pero también se puntualizó que el análisis debería ser hecho en conjunto y la cercanía del indicador al valor recomendado hace que sea un tanto más difuso valorar esta situación.

Tabla 3.6. Indicadores emergéticos para el sistema objeto de estudio. **Fuente.** Elaboración propia.

Indicadores	Valor
Razón de renovabilidad (%R)	36,55
Razón de eficiencia emergética (EYR)	1,94
Razón de carga ambiental (ELR)	1,74
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	1,12

Por otra parte, el bajo valor de la razón de carga ambiental ($ELR < 2$) indica que el impacto ambiental de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio” 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. Por lo tanto, se debe valorar el impacto de la fábrica teniendo en cuenta las áreas aledañas. Además, como se consideraron las fracciones renovables y no renovables de la caña de azúcar es necesario también precisar el daño ambiental de las zonas productoras, que escapan al alcance de este trabajo. Entonces, un resultado más preciso de este indicador en el sistema agro-industrial cañero se obtendrá si se consideran tanto el sector agrícola como industrial en un conjunto.

A pesar de lo anterior el índice de sostenibilidad emergética (ESI) indica que a largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo ($ESI < 5$). No obstante, el valor obtenido ($ESI = 1,12$) da una medida 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.

Mediante la simulación realizada se pudo comprobar que las pérdidas de energía son cuantiosas por lo que la implementación de medidas para su reducción es importante. Durante el período en el que se desarrolló esta investigación se preveía el cambio de tecnología para reducir las pérdidas en los condensadores, así como la implementación del sistema de gestión ISO 9000 que favorecería enormemente a la entidad. A pesar de esto, según lo observado en la fábrica, la implementación de la normativa ISO 50 000 tendría también un impacto considerable en el proceso.

Otra problemática detectada durante la recopilación de datos está dada por las pérdidas de sacarosa en el proceso. En la Figura 3.5 aparece una comparación entre las pérdidas en indeterminados y cachaza con las estipuladas por la norma para la entidad.

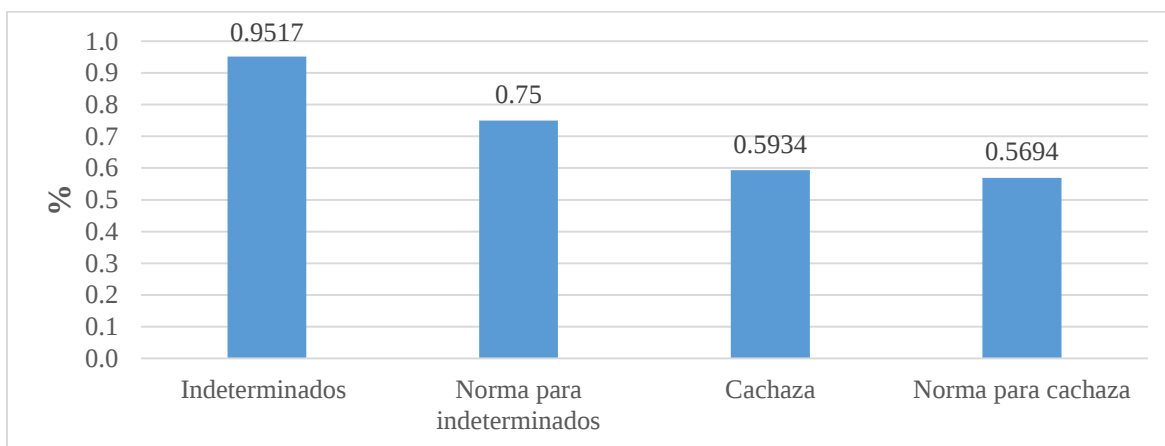


Figura 3.5. Pérdidas de % pol en indeterminados y cachaza por incumplimiento de la norma. **Fuente.** Laboratorio de Análisis de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”

Como se puede observar en la zafra 2014/2015 hubo un incumplimiento de estos indicadores lo que se manifestó en menor cantidad de azúcar vendida. Se estimó que, de haberse cumplido las normas y despreciando las pérdidas de sacarosa por inversión, se

hubiesen producido aproximadamente 112,94 t de azúcar más en el año. Esto disminuiría la transformidad del azúcar hasta $1,2298 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$ y aunque el descenso de este indicador no parece relevante el beneficio económico de vender el azúcar en el mercado sí tendría un impacto significativo.

3.5 Recomendación de alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad

- **Mejoramiento de las capacidades de los suelos**

La caña de azúcar constituye la principal materia prima de la fábrica de azúcar por lo que, de acuerdo al principio de Pareto, las mejoras sobre esta corriente son las que tendrán mayor impacto en el proceso. En la medida en que se logre mayores rendimientos agrícolas, sustituyendo el uso de fertilizantes sintéticos, la caña tendrá una menor transformidad favoreciendo la eficiencia del proceso agrícola como la sostenibilidad del proceso industrial.

La cachaza puede ser utilizada como fertilizante debido al contenido de nitrógeno, fósforo, calcio y materia orgánica que aporta al suelo. Logra incrementar la capacidad de intercambio catiónico del suelo por la producción de humus, aumentar su capacidad de retención de humedad y, como durante su descomposición se produce CO_2 que se transforma en H_2CO_3 junto con otros ácidos de origen orgánico, disuelve algunos nutrientes insolubles en suelo (Basanta, R. y col., 2007).

Sin embargo, para su uso agronómico se incurren en gastos de combustible para su transportación por lo que hay que evaluar la relación costo-beneficio de su aplicación. Por ello, el compostaje para la producción de abono de cachaza resulta más atractivo. La composta con cachaza aumenta la disponibilidad del nitrógeno antes de su aplicación y además se produce metano, el cual puede constituir un producto con valor agregado.

Otra alternativa interesante a valorar, dado que cierra el ciclo y puede mitigar el impacto ambiental del residual líquido de la fábrica, es el uso del fertirriego. Sin embargo, este debe realizarse sobre la base de las necesidades del suelo y no como una alternativa para su deposición. Además, debe establecerse una política de riego rotacional y a causa de la alta relación C/N del agua no debe aplicarse intensivamente durante las primeras etapas del desarrollo del cultivo donde los requerimientos de nitrógeno son mayores.

▪ Producción de alimento animal

Tomando en consideración que el bagacillo es un residuo con potencialidades de aprovechamiento económico y considerando que la presencia de este polvo orgánico en la atmósfera representa un peligro potencial para la salud de las personas; se justifica el desarrollo de tecnologías para la producción de alimentos de consumo animal. Por otra parte, el agravamiento de los períodos de sequía trae como resultado que toda la producción se considere estratégica para el mantenimiento y sostén de la masa ganadera del país dada la escasa disponibilidad de alimento para el rumiante, motivado por los altos precios de los concentrados proteicos y la baja calidad de los pastos (Díaz, J. C., 2015).

Como resultado de un proceso inversionista en el período de zafra 2011/2012 se logró recuperar la planta de alimento animal de la UEB “14 de Julio”, que se encontraba fuera de operación producto del deterioro. A pesar de esto, en la Figura 3.6 se puede observar que las producciones todavía son bajas por lo que no se logra cumplir toda la demanda de los clientes.

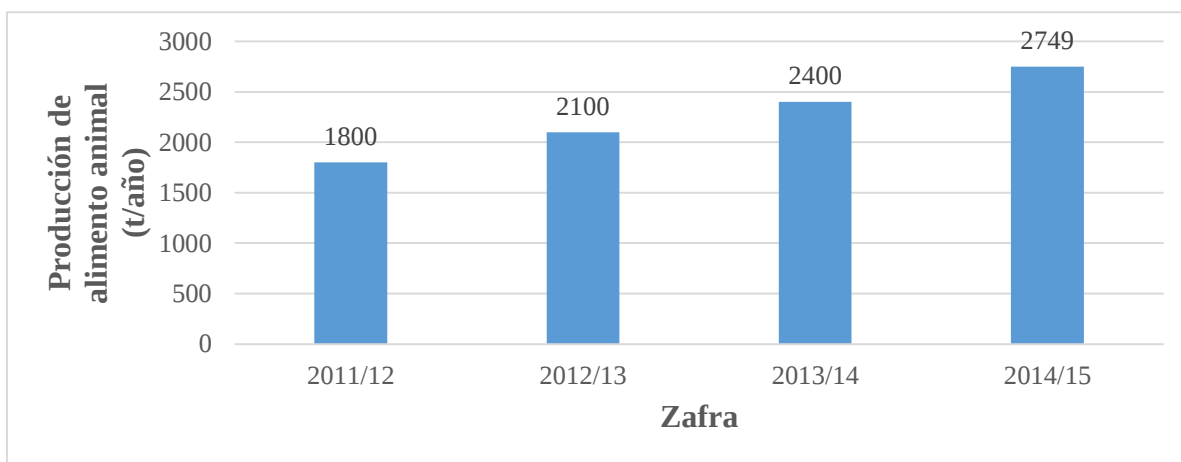


Figura 3.6. Producciones de la planta de alimento animal de la UEB “14 de Julio”. **Fuente.** (Díaz, J. C., 2015).

En base a lo anterior, es necesario valorar aumentar las capacidades de producción de alimento animal de la planta instalada. Desde la perspectiva de la sostenibilidad se fundamenta porque al utilizar el bagacillo, residuo del proceso de molienda, se disminuye el impacto ambiental de su deposición final. Además, esta alternativa tiene un fuerte componente social (Ramos, 2014) ya que tributa en última instancia a la alimentación humana.

- **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 (Ramos, 2014). En la Figura 3.7 se puede ver el comportamiento de la transformidad de la electricidad para las condiciones actuales del proceso y las señaladas anteriormente.

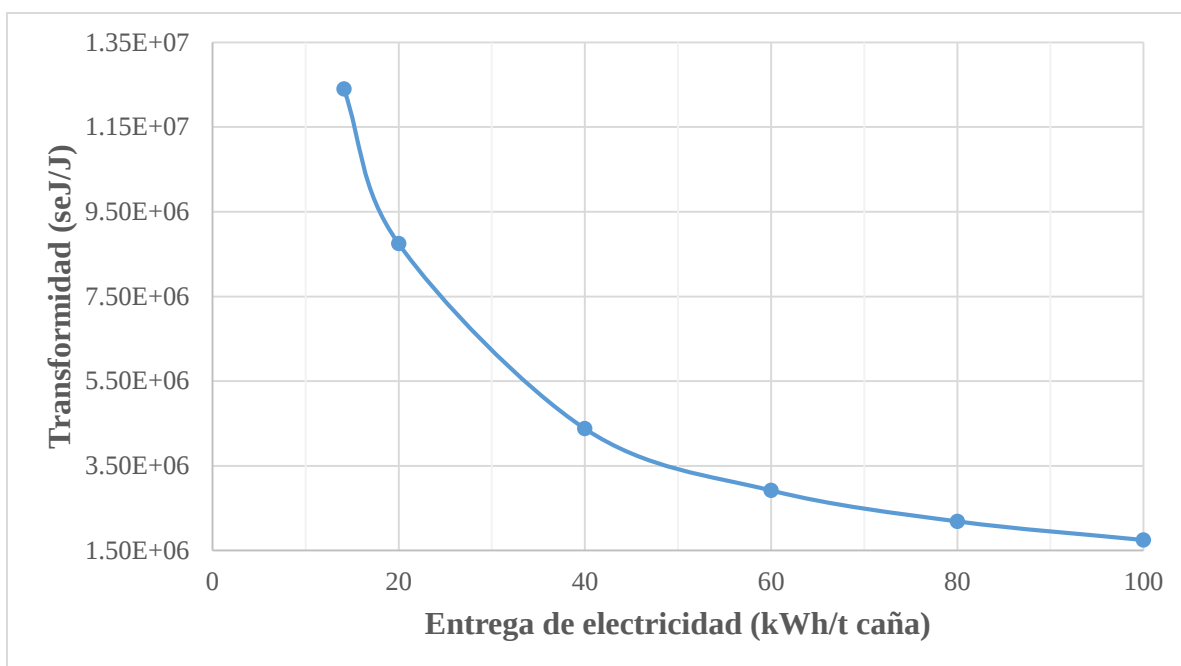


Figura 3.7. Comportamiento de la transformidad respecto a la entrega de electricidad al SEN. **Fuente.** Elaboración propia.

Esta figura muestra como la transformidad disminuye a medida que se aumenta la entrega de electricidad usando presiones más altas en las calderas. Sin embargo, a pesar de esto no se logra que este indicador sea más bajo que la de la electricidad producida convencionalmente (Tabla 3.7) por lo que, por este concepto, la producción de electricidad en termoeléctricas todavía es más eficiente energéticamente, que la que se puede obtener en la fábrica de azúcar objeto de estudio.

Tabla 3.7. Comparación de las transformidades de la electricidad. **Fuente.** Elaborado a partir de (Brown, M., T. and Ulgiati, S., 2004).

Planta	Capacidad instalada (MW)	Energía entregada (J/año)	Transformidad (seJ/J)	ELR
Convencional de oil	1280	2,35 E+16	3,54 E+05	23,26
Eólica	2,5	1,35 E+13	1,10 E+05	0,22
Geotermal	20	3,28 E+14	3,35 E+05	0,96
Hidroeléctrica	85	3,94 E+14	1,12 E+05	0,55
Caso de estudio	6,5	1,44 E+14	1,24 E+07	1,74

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 entonces a aproximadamente 3450,66 t de petróleo/año lo que sí resulta significativo.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. El estudio documental permitió establecer que el enfoque emergético constituye una herramienta para valorar la sostenibilidad de los procesos, una vez que logra contabilizar diferentes formas de energía, incluso intangibles como la labor humana y los flujos monetarios, en una unidad común, el emjoule solar (seJ). La posición ecocéntrica que adopta resulta adecuada para que esta evaluación sea congruente con los fundamentos de la Economía Ecológica.
2. El balance emergético reportó que el 51,44 % de la emergía del proceso ($1,3012 \text{ E}+20 \text{ seJ/año}$) proviene de la economía y que el 48,56 % ($1,2283 \text{ E}+20 \text{ seJ/año}$) del medio ambiente, por lo que existe una explotación discreta de los recursos naturales locales. Las transformidades calculadas para los principales productos fueron: $1,2328 \text{ E}+08 \text{ seJ/J}$ para el azúcar crudo y $1,2391 \text{ E}+07 \text{ seJ/J}$ para la electricidad; este resultado muestra que en la fábrica de azúcar es más eficiente la producción de electricidad que la producción de azúcar.
3. El valor del índice de sostenibilidad emergética calculado ($\text{ESI} = 1,12$) demostró la insostenibilidad a largo plazo de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”, aunque sí contribuye moderadamente a la economía local. El principal factor que aportó a este resultado fue el alto consumo de emergía proveniente de la economía para la producción de la caña de azúcar, principal materia prima del sistema analizado.
4. Las posibles alternativas a valorar para mejorar la sostenibilidad son: mejoramiento de las capacidades de los suelos con la utilización de la cachaza y residuales líquidos de la fábrica, producción de alimento animal por su marcado componente social y aumento de la producción de electricidad.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Evaluar holísticamente los procesos, agrícola e industrial, con el propósito de obtener un resultado más abarcador sobre la sostenibilidad de la UEB “14 de Julio”.
2. Socializar los resultados aquí obtenidos, para facilitar posteriores investigaciones en la industria azucarera; así como, favorecer la difusión de la metodología, dado los pocos estudios emergéticos en Cuba.
3. Valorar el impacto sobre la sostenibilidad de las alternativas recomendadas en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, C. (2017). *Evaluación emergética del proceso agrícola para la obtención de caña de azúcar en la UEB "14 de Julio"*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos.
- Aguilar, N., Houbbron, J., E. y Espinosa, R.,A. (2014). Análisis de la capacidad de diversificación de zonas productoras de caña de azúcar por metodologías emergy, análisis de ciclo de vida y evaluación multicriterio. *Centroazúcar*, 41.
- Aguilar, N., Rosas, J. y Espinosa, R. (2015). Evaluación Emergy y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, Mexico. *Cultivos Tropicales*, 36, 144-157.
- Álvarez, R. (2016). *Potencialidades de mejoras del esquema térmico del central azucarero "14 de Julio"*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- Arteaga, L., Cabrera, J. ; Rodríguez, L. y Casas, Y. (2014). Termoconversión de los residuos sólidos de la industria azucarera para incrementar la sostenibilidad de los procesos. *Centroazúcar*, 41.
- Atkins, P. and de Paula, J. (2010). *Physical Chemistry* (9 ed.). New York: W. H. Freeman and Company.
- Basanta, R., García, M., Cervantes, J, Mata, H. y Bustos, G. (2007). Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(4), 293-305.
- Brandt-Williams, S. (2002). Emergy of Florida Agriculture *Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios* (Vol. 4). Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy.
- Brown, M., T. and Herendeen, R., A. (1996). Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 19, 219-235.
- Brown, M., T. and Ulgiati, S. (1997). Emergy based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology towards environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 9, 51-69.
- Brown, M., T. and Ulgiati, S. (2004). Emergy Analysis and Environmental Accounting. In C. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (pp. 329-354). Oxford (United Kingdom): Elsevier.
- Brown, M., T. and Ulgiati, S. (2011). Understanding the global economic crisis: A biophysical perspective. *Ecological Modelling*, 223, 4-13.
- Brown, M., T., Brandt-Williams, S., Tilley, D, and Ulgiati, S. (1999). *Emergy Synthesis: An Introduction*. Paper presented at the Proceedings from the First Biennial Emergy Analysis Research Conference, Gainesville (Florida).
- Buenfil, A. (2001). Emergy evaluation of water. University of Florida, Gainesville. Retrieved from <http://cfw.essie.ufl.edu/Publications/pdfs/Buenfil,A.2001.Dissertation.pdf>
- Calvo, A., Medina, J., González, J. y Benítez, A. (2005). *Análisis combinado de exergía/emergía de la agroindustria azucarera de la caña: caso de estudio*. La Habana, Cuba.
- Campbell, D., E., Brandt-Williams, S., L. and Meisch, M., E. (2005). Environmental Accounting Using Emergy: Evaluation of the State of West Virginia (National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Trans.). United States: U.S. Environmental Protection Agency.

- Cano, A., Gallego, D. and Velásquez, H. (2014). Emergy Evaluation: A Tool for the Assessment of Sustainability in Project Development. *Engineering Research and Applications*, 4(2), 172-178.
- De-Vilbiss, C. and Brown, M.,T. (2015). New method to compute the emergy of crustal minerals. *Ecological Modelling*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.007>
- Díaz, J. C. (2015). *Propuesta de planta diversificada para la producción de alimento animal en la Unidad Empresarial de Base: Fábrica de Azúcar "14 de Julio"*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- Díaz, R. y Escárcega, S. (2009). *Desarrollo sustentable. Una oportunidad para la vida*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Dincer, I. and Rosen, M. (2007). *EXERGY. Energy, Environment and Sustainable Development*. United States: Elsevier.
- Entenza, G. A. (2013). *Estudio a la calidad del proceso de cristalización en el Central Azucarero 14 de Julio*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- Freide, M. L. (2015). *Propuesta para el aumento de capacidades en la Industria Azucarera Antonio Sánchez*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- 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.
- García, Y. (2014). *Ecología Industrial: ¿Estrategia de Desarrollo Sostenible para Cuba?* (Maestría en Producciones más Limpias), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- Giannetti, B., F., Prevez, L.; Agostinho, F. and 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.
- González-Corzo, M. (2015). *La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes*. New York: Bildner Center for Western Hemisphere Studies.
- Hau, J., L. and Bakshi, B,R. (2004). Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 178, 215-225.
- 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: Félix Varela.
- Jarméus, C. (2013). *Emergy Analysis of Biodiesel and Biogas Production from Baltic Sea Macro Algae*. (Master), Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Li, L., Hongfang, L., Campbell, D., E. and Ren, H. (2010). Emergy algebra: Improving matrix methods for calculating transformities. *Ecological Modelling*, 411-422.
- Lima, C. and Ortega, E. (2009). *Emergy Assessment of Ethanol Production From Sugarcane in Brazil*. Paper presented at the Proceedings from the Fifth Biennial Emergy Conference, Gainesville (Florida).
- 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*. (Doctorado), Universidad Autónoma de Madrid, España. Retrieved from https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/4124/28192_lomas_huertas_pedro.pdf;sequence=1#page=74

- Lomas, P., Di Donato, M. y Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Ecosistemas*, 37-45.
- Lomas, P., Martín, B., Rodríguez, M. y Montes, C. (2006). *La síntesis emergética ("emergy synthesis")*: Integrando Energía, Ecología y Economía. Madrid, España: Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales.
- Lotka, A., J. (1922). *Contributions to the enegetics of evolution*. Paper presented at the Biology, Johns Hopkins University,. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1085052/pdf/pnas01891-0031.pdf>
- Machín, F., y Fernández, E. (2015). Sostenibilidad de la agroindustria cubana y bioenergía. *Ciencia en su PC*, 85-101.
- Marquetti, H. (2006). Los retos de la recuperación de la industria azucarera. In A. Casanovas (Ed.), *Estructura económica de Cuba* (Vol. 2, pp. 70-81). La Habana (Cuba): Félix Varela.
- Martínez, P., J. y Rus, E. (2004). *Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Métodos de Cálculo*. Madrid, España: Pearson Education.
- McCabe, W., Smith, J. and Hariott, P. (1998). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (4 ed.). Madrid (España): McGraw-Hill.
- MCEIE. (2016). Cartera de Oportunidades de Inversión Extranjera, *Bohemia*, pp. 97-105. Retrieved from <http://bohemia.cu/wp-content/uploads/2016/11/Cartera-de-Oportunidades-de-Inversi%C3%B3n-Extranjera-2016-2017.pdf>
- Moring, V. (2006). *Termodinámica* (Vol. 2). La Habana: Félix Varela.
- Naredo, J., M. (1994). Fundamentos de la economía ecológica *De la Economía Ambiental a la Economía Ecológica* (pp. 231-252). Barcelona: Fuhem e Icaria.
- Nova, A. (2007). *La producción de alimentos, la bioenergía y las exportaciones de la agroindustria cañera, una decisión estratégica para la economía cubana*. Centro de Estudio de la Economía Cubana de la Universidad de La Habana. Cuba. Retrieved from https://www.nodo50.org/cubasigloXXI/economia/novag_310707.pdf
- Ochoa, P. A. (2008). *Las producciones más limpias en la gestión empresarial*. La Habana, Cuba: Félix Varela.
- Odum, H., T. (1996). *Environmental Accounting. Emergy and Decision Making*. New York: John Wiley.
- Odum, H., T. (2000a). *Emergy of Global Processes Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios* (Vol. 2). Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy.
- Odum, H., T. (2000b). *Energy, Hierarchy and Money*. Environmental Engineering Sciences. University of Florida. Gainesville (Florida). Retrieved from http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/documents/publications/Odum_HT_2000_EnergyHierarchyandMoney_EnvirEnginSciences_UFl_13pp.pdf
- Odum, H., T., Brown, M., T. and Brandt-Williams, S. (2000c). *Introduction and Global Budget Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios* (Vol. 1). Gainesville (Florida): Center for Environmental Policy
- Peña, L. (2014). *La inserción de la economía cubana en la economía internacional: los retos para la agroindustria de la caña de azúcar cubana*. Centro de Investigaciones de Economía Internacional. La Habana. Retrieved from <http://biblioteca.clacso.edu.ar/Cuba/ciei-uh/20140702015504/lainserciondelaeconomiacubana.pdf>

- Priest, J. (2006). Energy. In C. Cleveland, and Morris, C , (Ed.), *Dictionary of Energy* (1 ed., pp. 143). United States: Elsevier.
- Rabassa, G. y Pérez, A. (2015). Necesidades, limitaciones y proyecciones de los estudios de oportunidades de negocios en la industria azucarera *Centroazúcar*, 42, 1-9.
- Rajput, R., K. (2007). *Engineering Thermodynamics* (3 ed.). New Delhi: Laxmi Publications (P) LTD.
- Ramos, F. (2014). *Metodología de evaluación para la conversión de fábricas de azúcar a biorefinerías mediante lógica difusa*. (Doctorado), Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas, Santa Clara.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens
- Saldini, F., Vuai, S., Langat, B., Gustavsson, M., Bayitse, R., Gidamis, A., Belmakki, M. ; Owis, A., Rashamuse, K., Sila, D. and Bastianoni, S. (2016). Sustainability assessment of selected biowastes as feedstocks for biofuel and biomaterial production by emergy evaluation in five African countries. *Biomass and Bioenergy*, 85, 8.
- Sánchez, V., Gutiérrez, L., y Osorio, J.,A. (2006). Análisis emergético del policultivo de cachama blanca (*Piaractus brachipomus*) y bocachico (*Prochilodus sp.*) en la estación piscícola Vai, municipio de el Doncello – Caquetá -Colombia. *Momentos de Ciencia*, 2, 116-121.
- Scienceman, D., M. (1987). Energy and Emergy. In G. Pillet, and Murota, T (Ed.), *Environmental Economics* (pp. 257-276). Geneva, Switzerland: Roland Leimgruber.
- Sha, S., Melin, K. and Hurme M. (2013). Computer Aided Solar Energy Based Sustainability Evaluations in Process Design. *Chemical Engineering Transactions* 32.
- Simoncini, E., Coppola, S., Borsa, S. and Pulselli, F., M. (2009). Honey and sugar as surrogate products: an emergy evaluation. *Int. J. of Design and Nature and Ecodynamics*, 4(2), 143–153.
- Sweeney, S., Cohen, M., King, D. and Brown, M., T. (2007). *Creation of a Global Emergy Database for Standardized National Emergy Synthesis*. Paper presented at the Proceedings from the Fourth Biennial Emergy Conference, Gainesville (Florida).
- Tilley, D. (2014). Transformity dynamics related to maximum power for improved emergy yield estimations. *Ecological Modelling*, 12.
https://www.researchgate.net/profile/David_Tilley/publication/269518521_Transformity_dynamics_related_to_maximum_power_for_improved_emergy_yield_estimations/links/548dcddb0cf2d1800d841ebf.pdf
- Tirado, D. (2011). *Alternativas para el mejoramiento de la eficiencia del sistema de tratamiento de residuales líquidos en la industria de “14 de Julio”*. (Diploma), Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cienfuegos.
- UNWCED. (1987). *Our Common Future* (pp. 43). New York.
- Van Ness, H. and Abbott, M ,. (2008). *Thermodynamics Perry's Chemical Engineer's Handbook* (8 ed., pp. 4). United States: McGraw-Hill.
- 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.
- Voora, V. and Thrift, C,. (2010). *Using emergy to Value ecosystem Goods and Services*. Canada: Alberta Environment.

- Wall, G. (2006). Exergy. In C. Cleveland, and Morris, C, (Ed.), *Dictionary of Energy* (1 ed., pp. 156). United States: Elsevier.
- Wikipedia. (2017). Howard Thomas Odum.
https://en.wikipedia.org/wiki/Howard_T._Odum

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Biografía de Howard Thomas Odum.

Howard Thomas Odum (also known as Tom or just H.T.) (September 1, 1924 – September 11, 2002) was an American ecologist. He is known for his pioneering work on ecosystem ecology, and for his provocative proposals for additional laws of thermodynamics, informed by his work on general systems theory.

Odum left a large legacy in many fields associated with ecology, systems, and energetics. He studied ecosystems all over the world, and pioneered the study of several areas, some of which are now distinct fields of research. Odum published one of the first significant papers in each of the following areas: Ecological modeling, Ecological engineering, Ecological economics, Estuarine ecology, Tropical ecosystems ecology and General systems theory. Odum also wrote on radiation ecology, systems ecology, unified science, and the microcosm. He was one of the first to discuss the use of ecosystems for life-support function in space travel. Some have suggested that Odum was technocratic in orientation, while others believe that he sided with those calling for "new values."

In a controversial move, Odum, together with Richard Pinkerton (at the time physicist at the University of Florida), was motivated by Alfred J. Lotka's articles on the energetics of evolution, and subsequently proposed the theory that natural systems tend to operate at an efficiency that produces the maximum power output, not the maximum efficiency. This theory in turn motivated Odum to propose maximum power as a fundamental thermodynamic law. Further to this Odum also mooted two more additional thermodynamic laws, but there is far from consensus in the scientific community about these proposals, and many scientists have never heard of H.T. Odum or his views.

In the 1990s in the latter part of his career H.T. Odum together with David M. Scienceman developed the ideas of emergy, as a specific use of the term Embodied energy. Some consider the concept of "emergy", sometimes briefly defined as "energy memory", as one of Odum's more significant contributions. However, the concept is neither free from controversy nor without its critics.

Fuente: Elaborado a partir de (Wikipedia, 2017)

Anexo 2. Cambios en la energía y transformidad para un sistema.

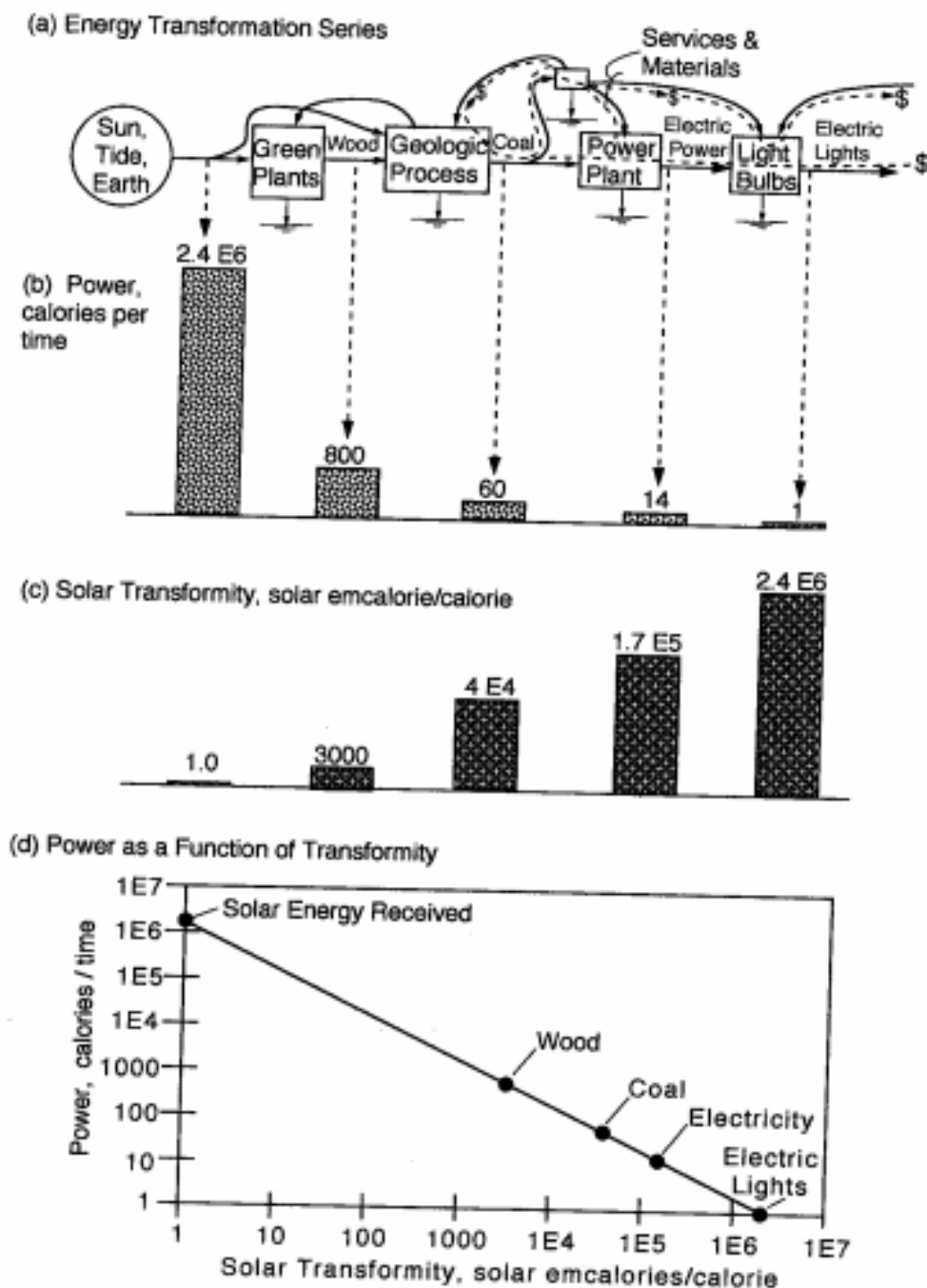
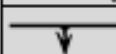
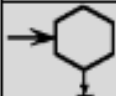
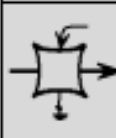
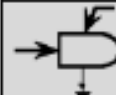
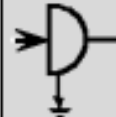
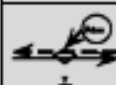


Figure 3. Energy transformation series showing the necessary solar energy for generating a joule of electric light using electricity from a coal-fired power plant. (a) Systems diagram; (b) available energy used in work in each transformation step; (c) solar transformity of the work products; (d) power used as a function of transformity on logarithmic coordinates.

Fuente: (Odum, H., T, 2000b)

Anexo 3. Símbolos más comunes para conformar un diagrama emergético.

	Energy circuit: A pathway whose flow is proportional to the quantity in the storage or source upstream.
	Source: An outside source of energy delivering forces according to a program controlled from outside; a forcing function.
	Tank: A compartment of energy storage within the system storing a quantity as the balance of inflows and outflows; a state variable.
	Heat sink: The dispersion of potential energy into heat that accompanies all real transformation processes and storages; loss of potential energy from further use by the system.
	Interaction: An interactive intersection of two pathways required to produce a particular outflow, such as a product or service.
	Consumer: A unit that transforms energy quality, stores it and feeds it back autocatalytically to improve inflow.
	Switching action: A symbol that indicates one or more switching actions—which means that the process can be turned on or off. The controlled flows enter and leave from the sides, and the pathways (thresholds and other information) that control the switches are drawn on top. Examples of switching actions include earthquakes and flooding events.
	Producer: These include units that collect and transform various inputs into a particular product. Examples of producers include plants and manufacturing processes.
	Self-limiting energy receiver: A unit that has a self-limiting output when input drives are high because there is a limiting constant quality of material reacting on a circular pathway within.
	Box: A miscellaneous symbol to use for whatever unit or function is labelled.
	Constant-gain amplifier: A unit that delivers an output in proportion to the input, I , but is changed by a constant factor as long as the energy source, S , is sufficient.
	Transaction: A unit that indicates a sale of goods or services (solid line) in exchange for payment of money (dashed line). Price is shown as an external source.

Fuente: (Voora, V. and Thrift, C., 2010)

Anexo 4. Emergy sustainability indicators.

Inputs and services	Expression	Meaning
Total emergy (Y)	$Y = I + F$	Emergy of total outputs
Nature's contribution (I)	$R + N$	Emergy of renewable and non-renewable resources
Renewable natural resources (R)		These could include rain, materials and services, nutrients from soil, minerals and air
Non-renewable natural resources (N)		These could include soil or biodiversity, but not people
Feedback from economy (F)	$F = M + S$	Total inputs originating from the economy and feeding back into the system
Materials (M): Renewable (Mr) and non-renewable (Mn) materials and energy	$M = Mr + Mn$	Renewable materials of natural origin. Non-renewable materials include minerals, chemicals, steels, fuel etc.
Services (S): Renewable (Sr) and non-renewable (Sn) services and externalities (Sa)	$S = Sr + Sn + Sa$	Renewable services include human labour supported by renewable sources, which can be local (Srl) and external (Sre). Non-renewable services include external services, taxes, insurance etc. Externalities include effluents, medical costs, job losses etc.

Inputs and services	Expression	Meaning
Emergy indicators		
Solar transformity (Tr)	$\frac{Y}{\sum Ep}$	Ratio of the output divided by the energy of the products
Renewability (%R)	$\frac{100x(R + Mr + Sr)}{Y}$	Ratio of renewable inputs divided by the total emergy of the system
Emergy yield ratio (EYR)	$\frac{Y}{Mn + Sn}$	Ratio of total emergy used divided by the emergy of non-renewable inputs from the economy
Emergy investment ratio (EIR)	$\frac{Mn + Sn}{R + Mr + Sr + N}$	Ratio of emergy of non-renewable economic inputs divided by the emergy of natural investments (natural inputs plus renewable inputs from the economy)
Environmental loading ratio (ELR)	$\frac{N + Mn + Sn}{R + Mr + Sr}$	Ratio of non-renewable emergy to renewable inputs.
Emergy exchange ratio (EER)	$\frac{Y}{[(\$)\times(\frac{sef}{\$})]}$	Ratio of emergy delivered by the producer to the economy divided by the emergy received from the sale of items produced
Emergy self-support ratio (ESR)	$\frac{R + N}{Y}$	Ratio of the emergy inputs to the total emergy
Emergy matching (EM)	$\frac{Subsystem}{Subsystem}$	Ratio that measures how well co-existent subsystems within an area balance one another in terms of their emergy values.
Emergy investment (EI)	$\frac{F}{(R + N)}$	Ratio between the emergy sources from the economy and free renewable sources
Environmental sustainability index (ESI)	$\frac{EYR}{ELR}$	Indicator of the sustainability of a system
Emergy flow density (ED)	$\frac{Y}{Area}$	Ratio of the emergy flow that is supporting a system divided by its area.
Social emergy indicators		
Labour services ratio (LSR)	$\frac{Sr}{S}$	This ratio represents human labour supported by renewable resources divided by the total value of services, including renewable and non-renewable services and externalities.
Labour empower ratio (LER)	$\frac{Sr}{Y}$	This ratio is defined as human labour supported by renewable resources divided by total emergy.
Labour work ratio (LWR)	$\frac{Srl}{S}$	The local human labour supported by renewable resources divided by the total value of services, including renewable and non-renewable services and externalities.
Externalities empower ratio (EER)	$\left(\frac{Sn}{Y}\right)$	The ratio is given by dividing the non-renewable services with the total emergy.

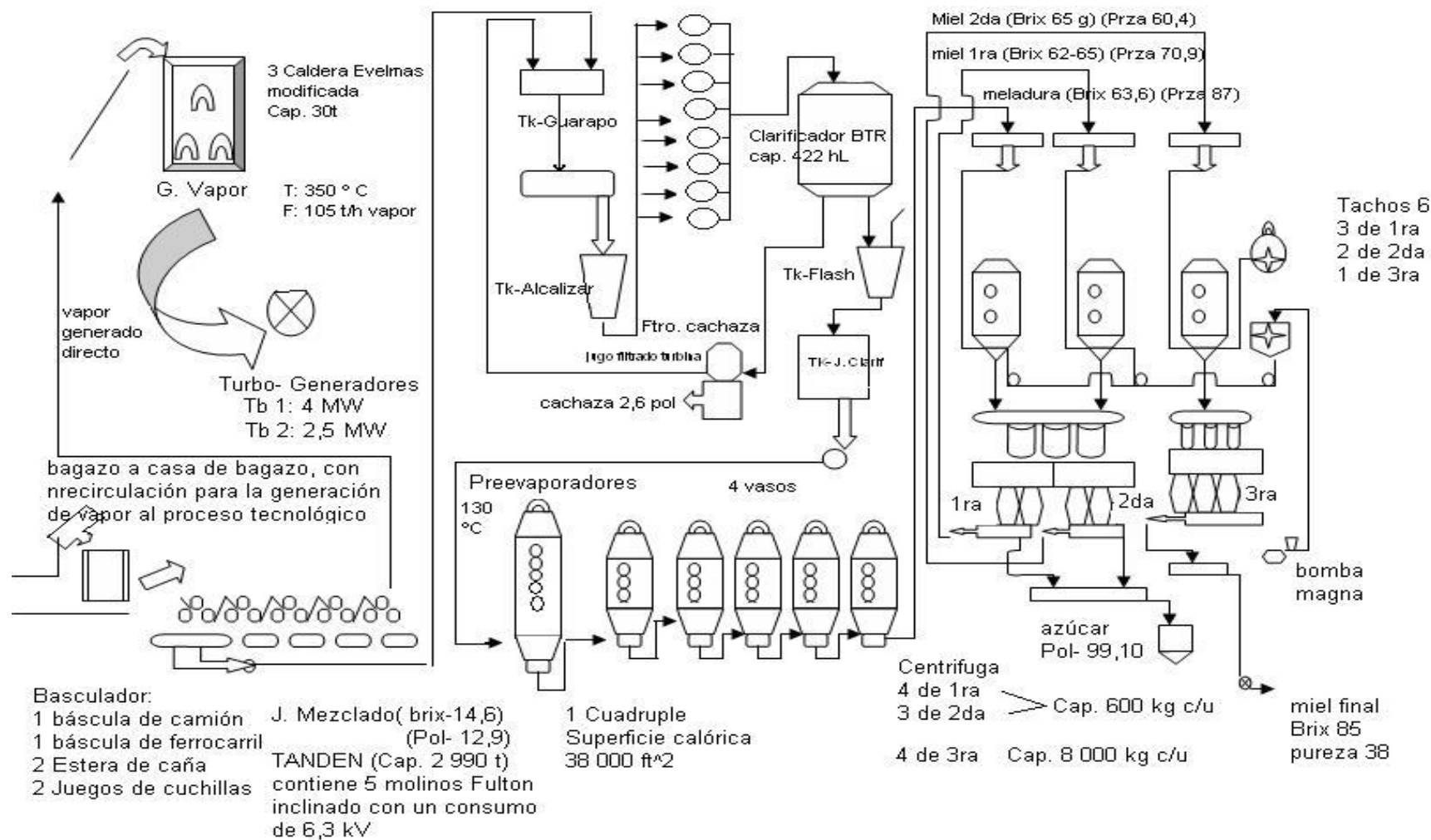
Fuente: (Voora, V. and Thrift, C., 2010).

Anexo 5. Indicadores energéticos.

ÍNDICE	FÓRMULA	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Energía de fuentes renovables	R	seJ/año	Entrada de Energía de fuentes renovables al sistema
Energía de fuentes no renovables locales	N	seJ/año	Entrada de Energía no renovable al sistema desde fuentes internas al mismo
Energía importada	F	seJ/año	Entrada de Energía desde fuentes externas (generalmente con un intercambio monetario)
Energía usada	U = R+N+F	seJ/año	Coste en energía de la producción del sistema
Fracción renovable de la energía usada	R/U	-	Parte renovable de la Energía empleada
Índice de apropiación y explotación de Energía (Energy yield ratio; EYR)	U/IMP= 1+1/EIR	-	Mide la contribución potencial de un proceso al conjunto del sistema debida a la explotación de recursos locales
Índice de inversión en Energía (Energy investment ratio; EIR)	F/(R+N)	-	Relación fuentes externas al sistema y fuentes internas al mismo. Mide la eficacia en el uso de la energía invertida en un proceso.
Índice de carga ambiental (Environmental loading ratio; ELR)	(F+N)/R	-	Índice de estrés ambiental debido a una producción. Indicador de la presión de un proceso de transformación sobre el medio ambiente
Índice de energía renovable capturada (Renewable energy captured)	R/F	-	Índice de efectividad del sistema socioeconómico en la captación de los flujos naturales.
Uso de Energía per capita	U/población	seJ/persona/año	Medida del nivel de vida potencial medio de una población
Intensidad territorial de potencia Energética (Areal empower density)	U/superficie del país	seJ/m ² /año	Índice de presión de un proceso sobre el territorio
Capacidad de carga renovable al nivel de vida actual (Renewable carrying capacity in the present lifestyle)	(R/U)*población	Población	Estima de la población que podría mantenerse dependiendo sólo de los recursos renovables con el estilo de vida actual.
Índice monetario Energético (Energy to money ratio; EMR)	U/PIB	seJ/\$	Relación Energía con unidades monetarias. Análisis de relaciones comerciales.
Índice de sostenibilidad (Energy sustainability index; ESI)	EYR/ELR	-	Medida de la contribución del sistema jerárquicamente superior a la producción del sistema por unidad de carga del mismo

Fuente: (Lomas, P., 2009)

Anexo 6. Mapa del proceso en la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.



Fuente: Laboratorio de Análisis de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”

Anexo 7. Reporte de zafra para el período 2014/2015.

Parámetros	Valor	Unidades
Días de zafra	139	días/año
Caña molida	401312,23	t/año
Caña molida	2886,29	t/día
Materias extrañas	10,8592	%
Pol en caña	12,4692	%
Fibra en caña	14,767685	%
Agua total	120088,72	t/año
Jugo mezclado	397902,73	t/año
°Brix Jugo absoluto	17,5135	-
Pureza jugo absoluto	83,5345	%
Extracción de pol	96,0863	%
Coeficiente de extracción	26,5007	%
Bagazo	123498,22	t/año
Pol bagazo	1,5858	%
Humedad bagazo	49,4443	%
Fibra bagazo	47,9907	%
Pérdida en molienda	3,3044	%
°Brix Jugo Mezclado	14,2588	%
Pureza jugo mezclado	84,7466	%
Miel final	10605,699	t/año
Cachaza	14245,774	t/año
Cachaza no agotada	9,0117	t/año
Humedad de la cachaza total	75,277	%
Azúcar	44121,13	t/año
Pol en residuales	97,8054	t/año
Flujo de residuales	0,2091	m3/t caña
Insumos		
Cal	356151	kg/año
Ácido clorhídrico	16281,4	kg/año
Sosa caustica	16500	kg/año
Soda ash	1800	kg/año
Floculante	2950	kg/año
Fosfato trisódico	1900	kg/año
Alcohol absoluto	2790	kg/año
Azúcar en polvo	1284,53	kg/año

Fuente. Laboratorio de Análisis de la UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”.

Anexo 8. Reporte de indicadores y corrientes del software TermoAzúcar.

Indicadores globales		
Nombre	Valor	Unidad
Bagazo sobrante % disponible	20,84	%
Consumo vapor de la fábrica % flujo másico caña	51,68	%
Vapor total expulsado a la Atmósfera % flujo másico caña	8,8	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % Demanda escape proceso	21,63	%
Vapor directo a escape por válvula reductora 1 % flujo másico de caña	11,18	%
Vapor escape reductora proceso 1 % vapor extracción simple efecto o efecto 1 múltiple	0	%
Vapor escape reductora proceso 1 % flujo másico caña	0	%
Producción Eléctrica Específica de la Fábrica	43,14	kWh/t caña
Demanda Eléctrica Específica de la Fábrica	29,01	kWh/t caña
Electricidad vendida al SEN	14,13	kWh/t caña
Déficit de condensados puros % flujo másico caña	0	%
Sobrante de Condensados Puros % flujo másico caña	2,9	%
Sobrante de Condensados Puros % Consumo Vapor de la Fábrica	5,61	%
Total de condensados contaminados % flujo másico caña	40,85	%
Sobrante de Condensados Contaminados % flujo másico caña	0	%
Déficit de condensados contaminados % flujo másico caña	1,46	%
Rendimiento industrial	11,6	%
Porcentaje explotación total capacidad nominal instalada	61,5	%
Eficiencia de los motores primarios en base a biomasa	12,91	%
Eficiencia térmica en base a biomasa	36,57	%
Eficiencia total de cogeneración en base a biomasa	49,48	%
Eficiencia de los motores primarios en base a vapor	19,11	%
Eficiencia térmica en base a vapor	54,16	%
Eficiencia total de cogeneración en base a vapor	73,28	%
Relación calor potencia	2,83	
Consumo de vapor de escape en el proceso % flujo másico caña	51,68	%
Porcentaje explotación capacidad nominal en Caldera I	75	%
Porcentaje explotación capacidad nominal en Caldera II	75	%
Porcentaje explotación capacidad nominal en Caldera III	34,49	%
Indicadores por área		
Nombre	Valor	Unidad
Consumo de vapor de escape en los evaporadores % flujo másico caña	42,88	%
Consumo de vapor en tachos % flujo másico caña	17	%
Consumo de vapor en tachos % peso SST en meladura	113,01	%

Consumo de vapor escape en proceso de crudo % flujo másico SST en jugo claro	113,01	%
Economía del área de evaporación	1,89	adimensional
Economía del múltiple efecto	1,89	adimensional
Tasa de evaporación del múltiple efecto	26,61	kg/h.m ²
Pérdidas calor evaporación al Condensador barométrico del múltiple % Demanda escape del proceso	23,16	%
Pérdidas calor en evaporaciones a condensadores barométricos de Casa de calderas	28,88	%

Indicadores de equipos

Nombre	Valor	Unidad
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Calentador Primario Jugo Alcalizado	389,43	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	839,01	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Calentador Jugo Claro	1272,35	W/m ² .K
Relación entre el CGTC Calculado y Hugot en Calentador Primario Jugo Alcalizado	43,95	%
Relación entre el CGTC Calculado y Hugot en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	94,28	%
Relación entre el CGTC Calculado y Hugot en Calentador Jugo Claro	129,94	%
Velocidad del jugo en Calentador Primario Jugo Alcalizado	1,52	m/s
Velocidad del jugo en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	1,54	m/s
Velocidad del jugo en Calentador Jugo Claro	1,48	m/s
Efectividad termodinámica en Calentador Primario Jugo Alcalizado	0,38	adimensional
Efectividad termodinámica en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	0,64	adimensional
Efectividad termodinámica en Calentador Jugo Claro	0,56	adimensional
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo de entrada en Calentador Primario Jugo Alcalizado	60,41	K
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo de entrada en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	37,41	K
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo de entrada en Calentador Jugo Claro	37,75	K
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo a la salida en Calentador Primario Jugo Alcalizado	37,41	K
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo a la salida en Calentador Rectificador jugo Alcalizado	13,41	K
Diferencia de temperatura entre el vapor y el jugo a la salida en Calentador Jugo Claro	16,75	K
Economía en Vaso 1	0,89	adimensional

Economía en Vaso 2	0,92	adimensional
Economía en Vaso 3	1,06	adimensional
Economía en Vaso 4	1,07	adimensional
Economía en Vaso 5	1,07	adimensional
Economía en Vaso 6	1,07	adimensional
Tasa de evaporación en Vaso 1	23,14	kg/h.m ²
Tasa de evaporación en Vaso 2	40,89	kg/h.m ²
Tasa de evaporación en Vaso 3	14,37	kg/h.m ²
Tasa de evaporación en Vaso 4	15,34	kg/h.m ²
Tasa de evaporación en Vaso 5	21,87	kg/h.m ²
Tasa de evaporación en Vaso 6	23,32	kg/h.m ²
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 1	1186,98	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 2	2074,07	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 3	913,22	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 4	748,81	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 5	854,63	W/m ² .K
Coeficiente de transferencia de calor calculado en Vaso 6	655,85	W/m ² .K
Consumo específico de vapor real en Turbo I	9,36	kg/kWh
Consumo específico de vapor real en Turbo II	9,44	kg/kWh
Índice de Generación Bruto con Bagazo en Caldera I	2,06	kg vapor/ kg bagazo
Índice de Generación Bruto con Bagazo en Caldera II	2,06	kg vapor/ kg bagazo
Índice de Generación Bruto con Bagazo en Caldera III	2,06	kg vapor/ kg bagazo
Índice de Generación Neto con Bagazo en Caldera I	1,54	kg vapor/ kg bagazo
Índice de Generación Neto con Bagazo en Caldera II	1,54	kg vapor/ kg bagazo
Índice de Generación Neto con Bagazo en Caldera III	1,54	kg vapor/ kg bagazo
Consumo másico específico de agua de inyección en Condensador barométrico múltiple	82,49	kg/kg
Consumo másico específico de agua de inyección en Condensador barométrico tacho	82,36	kg/kg
Diferencia terminal de temperatura en Condensador barométrico múltiple	11,14	K
Diferencia terminal de temperatura en Condensador barométrico tacho	9,1	K

Corrientes de Vapor y Agua

Nombre	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Flujo (kg/s)	% Caña
--------	--------------------	------------------	-----------------	-----------

c5(5)	623,15	1821	7,29	21,01
c6(6)	623,15	1821	7,29	21,01
c7(7)	623,15	1821	3,35	9,65
c8(8)	623,15	1821	10,64	30,66
c9(Consumo de vapor de la fábrica)	623,15	1821	17,93	51,67
c10(Vapor usado por Turbo I)	623,15	1821	9,88	28,47
c11(Vapor usado por Turbo II)	623,15	1821	4,17	12,02
c12(vapor escape Turbo II)	409	266	4,17	12,02
c13(vapor escape Turbo I)	409	266	9,88	28,47
c14(total de vapor de escape)	409	266	14,05	40,49
c15(Vapor expulsado atmósfera 1)	273,15	0	0	0
c16(Vapor reductora 1)	409	266	3,88	11,18
c18(Vapor total usado en el proceso)	409	266	17,93	51,67
c19(vapor consumido vaso 1)	402,75	266	7,33	21,12
c20(20)	402,75	266	7,33	21,12
c23(vapor consumido vaso 2)	402,75	266	9,22	26,57
c25(25)	402,75	266	9,22	26,57
c26(Evaporación Vaso1)	389,46	175,5	6,49	18,7
c27(Evaporación Vaso 2)	389,74	175,5	8,44	24,32
c28(vapor total de extracción)	389,42	175,5	14,93	43,03
c29(vapor expulsado atmósfera 2)	389,42	175,5	3,05	8,79
c30(vapor por reductora de proceso)	273,15	0	0	0
c31(31)	389,42	175,5	11,88	34,24
c32(vapor consumido múltiple efecto)	389,42	175,5	2,8	8,07
c33(33)	389,42	175,5	4,68	13,49
c34(Evaporación Vaso 4)	367,86	81	3,17	9,14
c35(Evaporación Vaso 3)	380,27	127,4	2,97	8,56
c36(Evaporación Vaso 5)	351,96	42,58	3,38	9,74
c41(Evaporación Vaso 6 hacia Cond Barométrico)	329,14	14,5	3,61	10,4
c42(42)	318	101	301,29	868,27
c43(43)	311	350	297,69	857,9
c44(Agua tecnológica tacho)	348	350	2,43	7
c45(Vapor consumido Tacho)	389,41	175,5	5,9	17
c48(Evaporación tacho hacia cond. barométrico)	327,1	15	5,42	15,62
c49(49)	318	101	451,75	1301,87
c50(50)	311	350	446,34	1286,28
c51(51)	379,8	228,77	2,97	8,56
c52(52)	367,07	182,37	3,17	9,14
c53(53)	350,57	143,95	3,38	9,74

c54(vapor total consumido en evaporadores)	402,75	266	14,88	42,88
c55(55)	402,75	367,37	7,33	21,12
c56(56)	402,75	367,37	9,22	26,57
c57(57)	389,41	276,87	2,8	8,07
c58(Vapor total de extracción)	389,42	175,5	13,4	38,62
c59(Déficit de Condensados puros)	273,15	0	0	0
c61(61)	389,41	175,5	1,55	4,47
c62(62)	389,41	175,5	1,63	4,7
c64(64)	389,41	175,5	1,63	4,7
c65(65)	389,41	175,5	1,55	4,47
c66(Sobrante de condensados puros)	398,16	101,35	1,01	2,91
c67(67)	365,17	101,35	9,52	27,44
c68(Total condensados contaminados)	374,51	101,35	14,17	40,84
c69(69)	398,16	101,35	0,91	2,62
c71(71)	402,75	266	1,38	3,98
c72(72)	374,34	101,35	14,07	40,55
c73(Total Condensados Puros)	398,16	101,35	18,94	54,58
c74(74)	623,15	101,35	17,93	51,67
c75(75)	398,16	101,35	0,1	0,29
c76(76)	402,75	266	1,38	3,98
c77(77)	303	500	14,68	42,31
c78(Sobrante de condensados contaminados)	273,15	0	0	0
c79(Déficit de condensados contaminados)	374,51	101,35	0,51	1,47
c80(80)	389,41	175,5	5,9	17

Corrientes azucaradas													
Nombre	Temperatura	Presión	Flujo Total	Agua	SSS	SSNS	SST	Fibra	INF	% Caña	°Brix	Pol	Pureza
	(K)	(kPa)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)		(%)	(%)	(%)
c1(Bagazo Disponible)	303	102	11	5,52	0,16	0,12	0,28	5,2	0	31,7	2,54	1,46	57,71
c2(2)	303	102	7,46	3,74	0,11	0,08	0,19	3,53	0	21,5	2,54	1,46	57,71
c3(3)	303	102	3,92	1,97	0,06	0,04	0,1	1,85	0	11,3	2,54	1,46	57,71
c4(Bagazo Sobrante)	303	102	2,29	1,15	0,03	0,02	0,05	1,08	0	6,6	2,54	1,46	57,71
c17(Jugo Alcalizado)	329	750	38,18	32,7	4,62	0,83	5,45	0	0	110,03	14,3	12,1	84,77
c21(21)	389,46	175,5	29,95	24,7	4,45	0,77	5,22	0	0	86,31	17,4	14,9	85,25
c22(22)	386	550	36,44	31,2	4,45	0,77	5,22	0	0	105,01	14,3	12,2	85,25
c24(24)	389,74	175,5	21,51	16,3	4,45	0,77	5,22	0	0	61,99	24,3	20,7	85,25
c37(37)	380,27	127,4	18,54	13,3	4,45	0,77	5,22	0	0	53,43	28,2	24	85,25
c38(38)	367,86	81	15,38	10,2	4,45	0,77	5,22	0	0	44,32	33,9	28,9	85,25
c39(meladura)	329,14	14,5	8,39	3,17	4,45	0,77	5,22	0	0	24,18	62,2	53,1	85,25
c40(40)	351,96	42,58	11,99	6,77	4,45	0,77	5,22	0	0	34,55	43,5	37,1	85,25
c46(miel final)	328	101,35	1,37	0,17	0,45	0,75	1,2	0	0	3,95	87,6	33,1	37,82
c47(Azúcar producida)	328	101,35	4,03	0,01	4	0,02	4,02	0	0	11,61	99,9	99,3	99,41
c60(60)	352	750	38,18	32,7	4,62	0,83	5,45	0	0	110,03	14,3	12,1	84,77
c63(Jugo Alcalizado hacia tanque flash)	376	750	38,18	32,7	4,62	0,83	5,45	0	0	110,03	14,3	12,1	84,77
c70(Jugo claro)	365	550	36,44	31,2	4,45	0,77	5,22	0	0	105,01	14,3	12,2	85,25
SSS: Sólidos solubles sacarosa		SSNS: Sólidos solubles no sacarosa				SST: Sólidos solubles totales				INF: Insolubles no fibra			