



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

## TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**Título. Evaluación de la sostenibilidad de la biomasa cañera a partir de métodos de decisión multicriterios.**

**Autor. Andrés Lorenzo Álvarez González.**

**Tutor(es). MSc. Reinier Jiménez Borges.**

**Dr.C Eduardo Julio López Bastida.**

Cienfuegos, 2019.

“Año 61 de la Revolución”

## DECLARATORIA DE AUTORIDAD



Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado:

“Evaluación de la sostenibilidad de la biomasa cañera a partir de métodos de decisión multicriterios”.

Que constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución. Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Autor: Andrés L. Álvarez González.

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.

\_\_\_\_\_  
Información Científico Técnico  
Nombre y Apellidos. Firma.

\_\_\_\_\_  
Firma del Vice Decano.

\_\_\_\_\_  
Firma Tutor

\_\_\_\_\_  
Sistema de Documentación y Proyecto.  
Nombre y Apellido. Firma.

*Pregúntate si lo que estás haciendo hoy te acerca al lugar donde  
quieres estar mañana.*

*Walt Disney*

*Hay personas que solo con existir, hacen que todo en la vida sea más fácil. Este triunfo va dedicado en especial:*

- 👍 A mis padres por ser fuentes de inspiración y mis motivos de superación en la vida.*
- 👍 A mi hermana por ser incondicional y por estar siempre a mi lado cuando la necesito.*
- 👍 A mi sobrino por llenarme la vida de momentos maravillosos.*
- 👍 A mi tía por el amor infinito y la dedicación mostrada durante toda su vida.*
- 👍 A mis abuelos por ser sinónimos de amor, esfuerzo y comprensión.*
- 👍 A todas las personas que confiaron en mí y que de una forma u otra han contribuido a mi formación profesional.*

*Si A agrupa los componentes que posibilitaron el desarrollo de este trabajo, entonces  $A=X+Y+Z$ . Donde X representa el esfuerzo de mi familia, Y la guía de mis tutores y Z la entereza de la Revolución Cubana. Por lo que hacia ellos va dirigido mi enorme agradecimiento.*

## SIMBOLOGÍA

BTE-----	Conversión de biomasa en energía.
MCDA-----	Análisis de decisión multi-criterio.
EJ-----	Exa-joule.
Mtoe-----	Mega-tonelada equivalente de petróleo.
MW-----	Mega-Watt.
kWh-----	kilowatt-hora.
GWh/año-----	Gigawatt-hora al año.
EJ yr <sup>-1</sup> -----	Exa-joule por año.
PJ-----	Peta-joule.
Mg-----	Mega-gramo.
m <sup>3</sup> -----	Metros cúbicos.
seJ-----	emjulio o julio emergético.
CUC-----	Peso Cubano Convertible.
e <sub>aa</sub> -----	Exergía específica del agua de alimentar (kJ/kg).
h <sub>aa</sub> -----	Entalpía del agua de alimentación (kJ/kg).
h <sub>o</sub> -----	Entalpía a las condiciones del estado de referencia (kJ/kg).
T <sub>o</sub> -----	Temperatura del estado de referencia (K).
s <sub>aa</sub> -----	Entropía del agua de alimentar (kJ/kgK).
s <sub>o</sub> -----	Entropía a las condiciones del estado de referencia (kJ/kgK).
E <sub>aa</sub> -----	Exergía del agua de alimentar (kW).
m <sub>H<sub>2</sub>O</sub> -----	Flujo del agua de alimentar (kg/h).
E <sub>combustión</sub> -----	Exergía de la combustión (kW).
m <sub>Comb</sub> -----	Flujo másico o consumo de combustible (kg/h).
Q <sub>d</sub> -----	Calor disponible (kJ/kg)
E <sub>combustible</sub> -----	Exergía del combustible (kW).
h <sub>Comb</sub> -----	Entalpía del combustible (kJ/kg).
T <sub>gs</sub> -----	Temperatura de los gases a la salida (°C).
α <sub>H</sub> -----	Coeficiente de exceso de aire en el horno.
D <sub>v</sub> -----	Generación de vapor (ton/h).

$m_{ge}$ -----	Flujo exergetico de los gases de escape (kg/h).
$\rho_{ge}$ -----	Densidad de los gases de escape (kg/m <sup>3</sup> ).
$V_{ge}$ -----	Volumen especifico de los gases de escape (m <sup>3</sup> /kg).
$E_{ge}$ -----	Exergía de los gases de escape (kW).
$C_p$ -----	Calor especifico de los gases de escape (kJ/kgK).
$T_{ge}$ -----	Temperatura de los gases de escape (K).
$e_{vs}$ -----	Exergía especifica del vapor saturado (kJ/kg).
$h_{vs}$ -----	Entalpía del vapor saturado (kJ/kg).
$s_{vs}$ -----	Entropía del vapor saturado (kJ/kgK).
$E_{vs}$ -----	Exergía del vapor producido por la caldera (kW).
$m_{vapor}$ -----	Flujo de vapor (kg/h).
$E_{cal_v}$ -----	Pérdidas de exergía en el generador de vapor (kW).
$E_{ent}$ -----	Exergía de las entradas.
$E_{sal}$ -----	Exergía de las salidas.
$F_{aire N}$ -----	Fracción de aire no renovable.
$V_{aire}$ -----	Flujo de aire (kg/año).
$\rho_{aire}$ -----	Densidad del aire a condiciones ambientales (kg/m <sup>3</sup> ).
$V_a$ -----	Flujo de aire (J/año).
$V_{aR}$ -----	Flujo de aire renovable (J/año).
$V_{aN}$ -----	Flujo de aire no renovable (J/año).
$m_{H_2O}$ -----	Flujo de agua (kg/año).
Labor-----	Estimación de la labor humana (J/año).
$m_{c H_2O}$ -----	Flujo de costos del agua (CUC/año).
$m_{c comb}$ -----	Flujo de costos del combustible (CUC/año).

## RESUMEN

Esta investigación se centra en demostrar el uso del proceso de jerarquía analítica (AHP) y la técnica MCDA para abordar el problema que existe en nuestro país de la no existencia de metodologías actuales que incorporen indicadores de economía ecológica para la evaluación del potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera. Los juicios emitidos sobre las comparaciones por pares entre la opción BTE con respecto a cada criterio y sub-criterio se forjaron en base al desarrollo de tres balances de costes físicos (energético, exergético y emergético) para las diferentes alternativas de combustión de biomasa cañera existentes en el territorio, permitiendo comparar sobre la misma base los procedimientos allí investigados. Los resultados obtenidos del análisis AHP muestran que los criterios de emergencia y exergía son considerados como los factores más importantes que informan para la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa, con un PVE de 0,539 y 0,297 respectivamente, seguido del análisis energético (PVE = 0,164). Basado en estos criterios de preferencias la alternativa más adecuada para la conversión de biomasa en energía es la variante I, seguido de la variante III y II respectivamente. El estudio concluye con un análisis sensitivo que permite visualizar como varía la clasificación general de las alternativas con respecto a cambios en las prioridades de los criterios y sub-criterios. El curso de acción propuesto no solo beneficiará a la industria azucarera, sino que también ayudará en el desarrollo económico del país a través de la producción de electricidad a partir de estas biomásas.

**Palabras claves:** análisis de decisión multicriterio, análisis sensitivo, biomasa cañera, proceso de jerarquía analítica.

## SUMMARY

This research focuses on demonstrating the use of analytical hierarchy process (AHP) and MCDA technique to address the problem that exists in our country of the non-existence of current methodologies that incorporate ecological economy indicators for the evaluation of sugarcane biomass potential. The judgments issued on the pairwise comparisons between the BTE option with respect to each criterion and sub-criterion were forged based on the development of three physical cost balances (energy, exergy and emergy) for the different alternatives of sugarcane biomass combustion existing in the territory, allowing to compare on the same basis the procedures investigated there. The results obtained from the AHP analysis show that the emergy and exergy criteria are considered as the most important factors that inform for the evaluation of biomass sustainability, with a PVE of 0,539 and 0,297 respectively, followed by the energy analysis (PVE = 0,164). Based on these preference criteria, the most suitable alternative for the conversion of biomass into energy is variant I, followed by variant III and variant II. The study concludes with a sensitive analysis that shows how the overall rankings of alternatives change with respect to changes in the priority weights of the criteria or sub-criteria. The proposed course of action will not only benefit the sugar industry, but will also assist in the economic development of the country through the production of electricity from these biomass.

**Keywords:** multi-criteria decision analysis, sensitivity analysis, sugarcane biomass, analytical hierarchy process.

# Tabla de contenido

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. CRÍTICA A LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>5</b>
I.1 Introducción al capítulo .....	5
I.2 Situación actual de las Fuentes Renovables de Energía (FRE). Perspectivas internacionales y nacionales .....	5
I.3 Biomasa. Ciclo y proyección .....	12
I.4 Proceso o ciclo de trabajo de la biomasa cañera .....	13
I.5 Potencial de biomasa en el mundo y en Cuba.....	16
I.6 Estimación de la biomasa con propósitos energéticos .....	18
I.7 Métodos para el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) .....	21
I.7.1 Visión general de los métodos para la toma de decisiones multi-criterios .....	21
I.7.2 Técnicas de MCDA y proyectos energéticos renovables .....	22
I.8 Sostenibilidad de la biomasa con fines energéticos .....	27
Conclusiones parciales .....	31
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LA BIOMASA.....</b>	<b>33</b>
II.1 Introducción al capítulo .....	33
II.2 Metodología multicriterio para evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera con fines energéticos .....	33
II.3 Metodología para el cálculo de los balances de costes energéticos .....	33
II.3.1 Descripción de la biomasa .....	34
II.3.2 Balance de energía en el proceso de combustión .....	38
II.3.2.1 Cálculo de la eficiencia energética .....	38
II.3.3 Balance de exergía en el proceso de combustión.....	40
II.3.4 Balance de emergía en el proceso de combustión .....	44
II.3.4.1 Diagrama de flujos .....	45
II.3.4.2 Construcción de tablas emergéticas.....	46
II.3.4.3 Cálculo de indicadores emergéticos .....	47
II.4 Análisis multicriterio. Proceso de jerarquía analítica (AHP) .....	49
Conclusiones parciales .....	53

<b>CAPÍTULO III: SOTENIBILIDAD DE LA BIOMASA CAÑERA A PARTIR DEL MÉTODO AHP</b>	<b>55</b>
.....	55
III.1 Introducción al capítulo .....	55
III.2 Levantamiento de las biomasas cañeras que existen en el territorio .....	55
III.3 Descripción de la tecnología .....	56
III.4 Resultados de la metodología de costes físicos o energéticos .....	57
III.4.1 Análisis energético .....	57
III.4.2 Análisis exergetico.....	58
III.4.2.1 Determinación de la eficiencia exergetica .....	58
III.4.2.2 Cálculo de los costos exergeticoeconomicos.....	60
III.4.3 Análisis emergetico .....	61
III.4.3.1 Resultados de la tabla emergetica.....	62
III.4.3.2 Análisis de indicadores emergeticos.....	63
III.5 Desarrollo del modelo AHP .....	64
III.6 Aplicación del AHP .....	66
III.6.1 Análisis de sensibilidad .....	73
Conclusiones parciales .....	74
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>

### Índice de tablas (Capítulo I)

Tabla I.1 Áreas de aplicación de los métodos multicriterios en proyectos de energía renovable. ....	23
---	----

### Índice de tablas (Capítulo II)

Tabla II.1 Composición de la masa de trabajo del Bagazo (%).....	35
Tabla II.2 Composición de la masa de trabajo de los RAC (%).....	36
Tabla II.3 Variantes de relaciones de energía (%).....	36
Tabla II.4 Relación entre las energías de entrada al horno de la caldera de bagazo con el combustible adicional .....	37
Tabla II.5 Análisis gravimétrico de las combinaciones. ....	37
Tabla II.6 Poder Calorífico Inferior de las combinaciones .....	40
Tabla II.7 Expresiones para el cálculo de la eficiencia exergética.....	42
Tabla II.8 Ejemplo típico de una tabla emergética. ....	46
Tabla II.9 Expresiones para el cálculo de los flujos emergéticos. ....	47
Tabla II.10 Escala de nueve puntos Saaty para la comparación por pares. ....	52
Tabla II.11 Valores de índice aleatorio ( <i>RI</i> ) para diferentes tamaños de matrices.....	53

### Índice de tablas (Capítulo III)

Tabla III.1 Bagazo producido y utilizado como combustible en toneladas en las tres últimas zafras. ....	55
Tabla III.2 Paja en los Centros de Limpieza en las tres últimas cosechas.....	56
Tabla III.3 Valores de eficiencia energética por ambos métodos en % y bibliografía consultada.....	57
Tabla III.4 Parámetros de trabajo de una caldera RETAL.....	58
Tabla III.5 Entalpías de las diferentes entradas y salidas del sistema. ....	59
Tabla III.6 Entropías de las diferentes entradas y salidas del sistema. ....	59
Tabla III.7 Condiciones de los gases de escape.....	59
Tabla III.8 Exergías específicas en kJ/kg.....	59
Tabla III.9 Exergía de entrada y salida del sistema. ....	60
Tabla III.10 Valores de pérdidas y de eficiencia exergética.....	60
Tabla III.11 Datos preliminares para el cálculo exergoeconómico. ....	60
Tabla III.12 Costos exergoeconómicos de la producción de vapor. ....	61
Tabla III.13 Clasificación de las principales entradas del sistema para la variante II.....	62
Tabla III.14 Transformidad y la bibliografía de la que fue tomada.....	62
Tabla III.15 Tabla emergética para la variante II.....	63
Tabla III.16 Emergía específica del vapor producido.....	63
Tabla III.17 Indicadores emergéticos para la variante II. ....	64
Tabla III.18 Comparación matricial por pares de los criterios con respecto al objetivo.....	67
Tabla III.19 Computación del vector de prioridad local.....	67
Tabla III.20 Comparación matricial por pares de los sub-criterios con respecto a criterios relativos.....	68
Tabla III.21 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio En1. ....	69
Tabla III.22 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio En2. ....	69
Tabla III.23 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Ex1. ....	69
Tabla III.24 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Ex2. ....	69
Tabla III.25 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Em1. ....	70
Tabla III.26 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Em2. ....	70
Tabla III.27 Sumario de prioridades para pesos de factores en posibilidades de BTE. ....	70
Tabla III.28 Resultados finales en forma de prioridades normalizadas e idealizadas.....	72

**Índice de figuras (Capítulo I)**

Figura I.1 (a) Demanda primaria de energía, 2035 (Mtoe); (b) cuota de crecimiento mundial 2012-2035. ..6

Figura I.2 Cuota de energía renovable estimada en la producción mundial de electricidad, finales-2016. ..6

Figura I.3 (a) Generación de electricidad a partir de combustibles seleccionados, (b) generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía. ....7

Figura I.4 Capacidad instalada para la generación eléctrica ALC [ MW; %] 2016. ....8

Figura I.5 Capacidad instalada de generación eléctrica [MW; %]. ....8

Figura I.6 La generación con fuentes renovables de energía es una prioridad para Cuba.....10

Figura I.7 Cantidad de empleos generados por las tecnologías renovables de energía en el periodo 2012-2017.....11

Figura I.8 Desglose geográfico del aumento en la capacidad renovable de generación de electricidad 2018-2050. ....12

Figura I.9 Ciclo de biomasa.....13

Figura I.10 Derivados, coproductos y subproductos de la agroindustria azucarera.....14

Figura I.11 Participación de la biomasa en el consumo total final de energía y en el consumo final de energía por sector de uso final, 2015.....16

Figura I.12 Consumo global de energía para la producción de calor, 2015. ....19

Figura I.13 Proceso de decisión multicriterio. ....22

Figura I.14 Desarrollo del marco integrado para evaluar la factibilidad de la utilización del bagazo. ....29

**Índice de figuras (Capítulo II)**

Figura II.1 Metodología propuesta para el análisis de la biomasa como fuente de energía a partir de métodos de decisión multicriterio. ....33

Figura II.2 Metodología de costes físicos o energéticos para el análisis de la biomasa como fuente de energía. ....34

Figura II.3 Balance de energía en un generador de vapor. ....38

Figura II.4 Corrientes de entrada y salida en un generador de vapor. ....42

Figura II.5 Esquema del balance energético en el proceso de combustión. ....45

Figura II.6 Diagrama energético del bloque de generación. ....45

Figura II.7 Enfoque propuesto para la evaluación de los diferentes tipos de combustión de biomasa cañera existentes en la provincia. ....50

**Índice de figuras (Capítulo III)**

Figura III.1 Estructura jerárquica. ....65

Figura III.2 Pesos locales de las alternativas bajo cada criterio de decisión. ....72

Figura III.3 Clasificación de las alternativas para criterios con igual peso. ....73

Figura III.4 Desempeño sensitivo de las alternativas con criterios energéticos más elevados (50%) .....74

## INTRODUCCIÓN

La explotación de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) como política energética está ganando un enorme interés durante los años recientes en el panorama estratégico mundial. El nacimiento de una conciencia ambiental, debido al incremento de los efectos negativos que producen los combustibles fósiles en el ambiente, la inevitable extinción de sus reservas, la naturaleza precaria de la dependencia en las importaciones de dichos combustibles, y la proveniencia de legislaciones confinando el uso de fuentes no renovables de energía ha forzado a muchos países, especialmente los más desarrollados, a buscar alternativas que contribuyan a fomentar el uso de FRE, en orden de alcanzar una mayor seguridad en sus opciones de suministro. Sin embargo, el cambio de los suministros de energía provenientes de combustibles fósiles hacia las fuentes renovables de energía no solo requiere de una expansión de la energía renovable sino también de otorgarle un uso más apropiado a esta (Yang, Ren, Solgaard, Xu & Nguyen, 2018).

La formulación política para la sustitución de la energía de los combustibles fósiles por FRE debe ser sobre la base de la decisión multi-criterio. La complejidad de la planeación energética y de los proyectos de energía hacen del análisis multi-criterio una herramienta útil en el proceso de toma de decisiones. (Michailos, Parker & Webb, 2016)

En este sentido, a nivel mundial, por razones ambientales, económicas y sociales, la agroindustria azucarera, como un sistema complejo, se enfrenta al reto de transitar hacia la diversificación productiva para garantizar su sostenibilidad como sistema productivo socioeconómico, derivado del inestable mercado azucarero. La naturaleza orgánica de los coproductos y subproductos de su procesamiento y las cantidades generadas cada temporada (zafra) son sus ventajas de potencialidad de reutilización y creación de nuevas cadenas productivas. Es decir, tienen la ventaja biológica de ser precursores abundantes, generados de una agroindustria establecida, que pueden ser modificados mediante ligeros cambios físicos, químicos o biológicos, y la energía para su transformación puede satisfacerse utilizando el bagazo de caña o los residuos agrícolas de cosecha (RAC).

En vistas de lo planteado el concepto de biomasa cañera está ganando adeptos, ya que puede ser utilizada para satisfacer una variedad de necesidades energéticas, incluyendo la generación de electricidad, calefacción de hogares, y proporcionar calor para procesos industriales, permitiendo así una mayor diversificación de la matriz energética.

La selección de la tecnología para la conversión de la biomasa en energía (BTE en inglés) es una decisión compleja e involucra muchos factores, como la calidad y la cantidad de biomasa (BQQ en inglés), factores sociales, medioambientales, tecnológicos y económicos (Qazi, Abushammala & Azam, 2018). La decisión para la tecnología BTE más óptima identificada no solo ahorra tiempo y dinero, sino también ayuda a aliviar los impactos negativos en el Medio Ambiente (Babalola, 2015). A medida que el número y la complejidad de las tecnologías alternativas para la conversión de biomasa en energía crece, también lo hacen las decisiones estratégicas que requieren una evaluación efectiva y una gestión de estos planes energéticos sostenibles. Esto ha llevado a la popularidad los métodos para el análisis de decisión multi-criterio (MCDA en inglés) para su uso en la toma de decisiones ambientales y para la planificación energética sostenible (Nixon, Dey & Ghosh, 2013).

Tradicionalmente en nuestro país los proyectos de planificación energética son desarrollados más bien sobre la base de motivos puntuales que sobre la evaluación científica meditada de múltiples criterios, por lo que eventualmente fracasan en términos de sostenibilidad y aceptación. Por esto, el modelado de políticas energéticas necesita de una consideración explícita de múltiples objetivos en los que se puedan conocer adecuadamente las partes interesadas y los criterios sostenibles.

### **Problema científico**

La no existencia de una metodología que permita evaluar con análisis de decisión multicriterio el potencial sostenible de uso de la biomasa cañera con fines energéticos.

### **Hipótesis:**

Es posible elaborar una metodología que permita evaluar la sostenibilidad de la biomasa cañera teniendo como base los métodos de decisión multicriterios.

**Objetivo general:**

Desarrollar una metodología que permita evaluar con base multicriterio el potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera con fines energéticos.

**Objetivos específicos:**

- I. Evaluar críticamente el estado del aprovechamiento de las biomásas en el mundo y en Cuba, así como las principales metodologías para su evaluación con fines energéticos.
- II. Elaborar una metodología con enfoque de Economía Ecológica que permita una valoración multicriterio de la factibilidad del uso de la biomasa cañera en Cienfuegos.
- III. Validar dicha metodología para las diferentes posibilidades de biomásas cañeras que existen en la provincia.



# *Capítulo I*

## **CAPÍTULO I. CRÍTICA A LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS**

### **I.1 Introducción al capítulo**

En este capítulo se describe el manejo de las fuentes renovables de energía, en particular la biomasa, tanto a nivel internacional como nacional. Se identifican una variedad de estudios vinculados a la estimación estadística del potencial energético de la biomasa, resaltando su utilidad y proyección en la futura demanda energética mundial. Finalmente se analizan las principales metodologías que incorporan los análisis de decisión multicriterio para la planificación energética renovable, destacando algunas investigaciones relacionadas a la evaluación del potencial sostenible de aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos.

### **I.2 Situación actual de las Fuentes Renovables de Energía (FRE). Perspectivas internacionales y nacionales**

La energía es un factor esencial para el desarrollo de la sociedad y la prosperidad de hoy en día. La diversificación de las fuentes de energía es vital, particularmente para los países desarrollados dependientes del petróleo, en orden de alcanzar una mayor seguridad en las opciones de suministro. Actualmente se vive en una sociedad cuyo desarrollo viene de la mano de un consumo insostenible, en donde se exigen unos estándares de calidad y confort cada vez mayores, los cuales deben ser suplidos a través de las fuentes actuales de producción de energía, y con el ritmo actual de crecimiento, su sostenibilidad es discutible. En la Figura I.1 se presenta la demanda energética primaria prevista para el año 2035 y la cuota de crecimiento que se espera en el período 2012-2035<sup>1</sup>. La zona geográfica con mayor cuota de crecimiento la representan los países asiáticos no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD en inglés), entre los que se desatacan países con altos estándares de consumo energético como China e India.

---

<sup>1</sup> El consumo energético global en el 2014 según Lapinskas (2017) alcanzó los 360 EJ (8 565 Mtoe).



Figura I.1 (a) Demanda primaria de energía, 2035 (Mtoe); (b) cuota de crecimiento mundial 2012-2035. Fuente: (Jonge, 2017)

Dentro de este marco las energías renovables han venido tomando fuerza desde hace varios años y en estos momentos se han establecido como fuentes importantes de energía alrededor del mundo en correspondencia con el creciente agotamiento de las fuentes convencionales. Prueba de ello es que dichas fuentes participaron en cerca de un 30% de la capacidad mundial de generación de electricidad, suficientes para suplir un 24,5% de la demanda eléctrica mundial a finales del año 2016 (superior al 23,7% del año anterior) tal y como se puede apreciar en la Figura I.2.

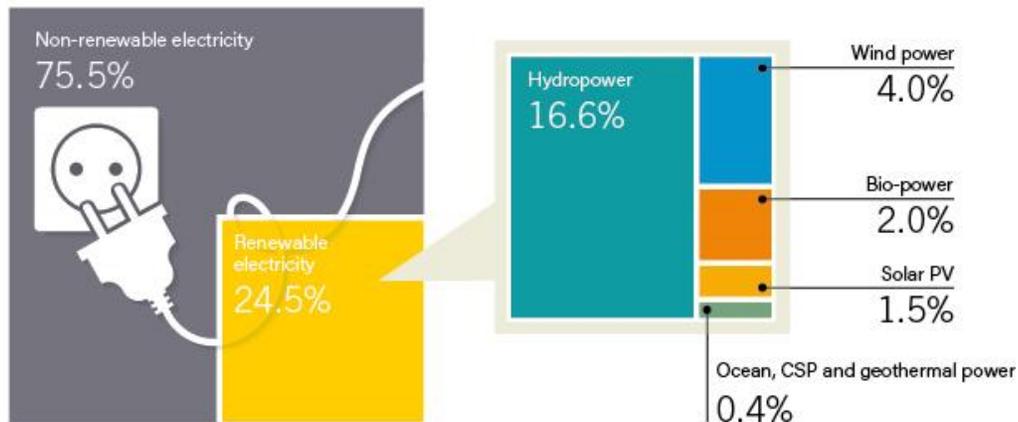
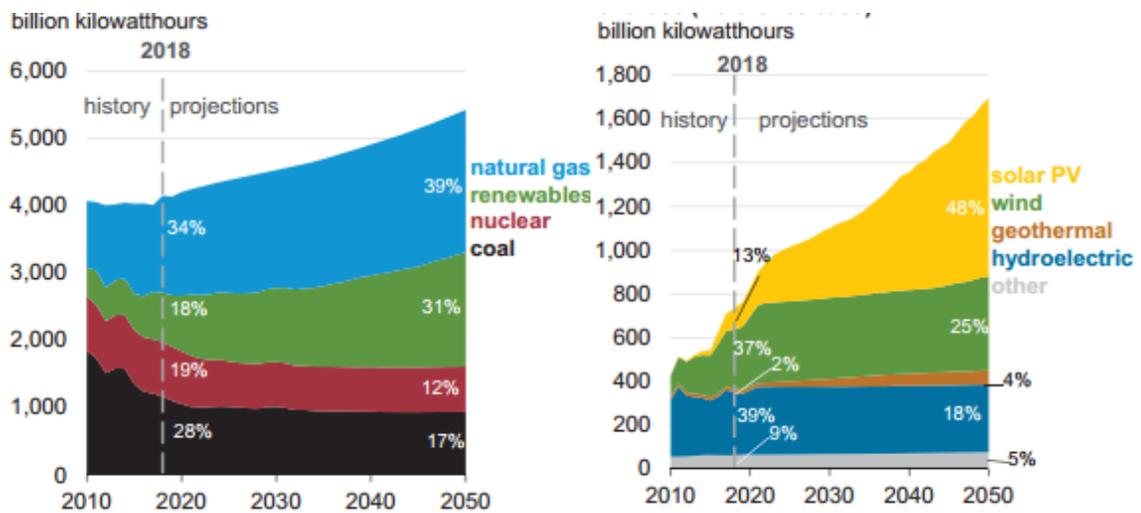


Figura I.2 Cuota de energía renovable estimada en la producción mundial de electricidad, finales-2016. Fuente (Douglas, 2018)

Para algunos países y regiones del mundo el cambio climático trae un profundo desafío a los modelos de desarrollo de sus sociedades contemporáneas, históricamente

dependientes del uso de combustibles fósiles como es el caso del gobierno de los Estados Unidos. Acorde a datos aportados por la Administración de Información Energética de ese país (EIA) en su Panorama Energético Anual del 2019 se puede apreciar que la generación de electricidad a partir de FRE se incrementará de un 18% a un 31% llevando consigo el desarrollo más significativo en el período 2018-2050. En la Figura I.3 se puede apreciar como la generación a partir del carbón y de la energía nuclear espera una decadencia en todos los escenarios, además de las cuotas de crecimiento en la generación de electricidad para cada FRE.



(a)

(b)

Figura I.3 (a) Generación de electricidad a partir de combustibles seleccionados, (b) generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía. Fuente: (EIA, 2019)

Por otra parte, el caso de América Latina y el Caribe (ALC) es paradigmático, ya que su matriz eléctrica está compuesta principalmente de fuentes limpias y renovables, derivadas de la abundancia de recursos hídricos (Figura I.4). Si bien esta característica parece distinguir a la región, ella no está exenta de los problemas inherentes al crecimiento constante de la demanda energética (Blanco, 2018).

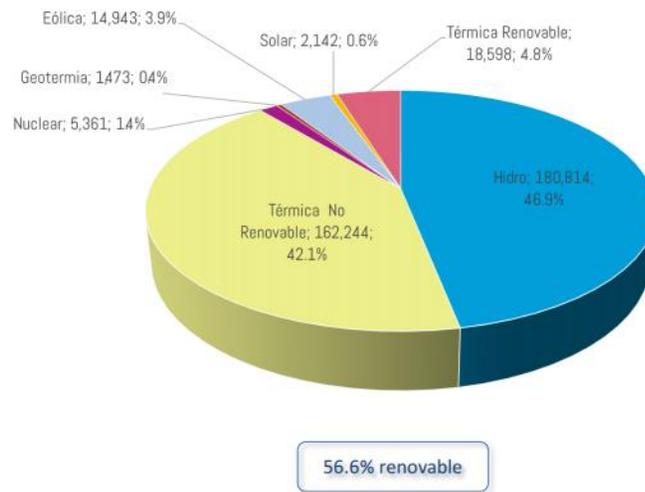


Figura I.4 Capacidad instalada para la generación eléctrica ALC [ MW; %] 2016. Fuente: (OLADE - Anuario de Estadísticas Energéticas, 2017)

Como casos destacables dentro de la región se encuentran Uruguay y Costa Rica, el primero con una capacidad de generación eléctrica instalada de 3 913 MW de los cuales 3 263 MW (83,4%) son generados por FRE. Mientras que Costa Rica cuenta 3 467 MW, de los cuales solo el 16,49% son producidos por fuentes no renovables de energía (Figura I.5), mostrando una matriz eléctrica excepcional proveniente de recursos limpios: hidroeléctrico, geotérmico, eólico, solar y biomasa.

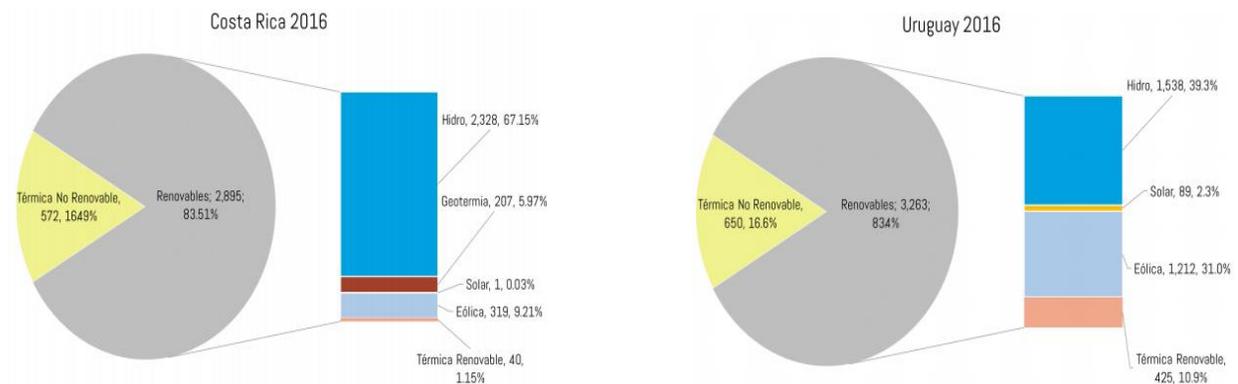


Figura I.5 Capacidad instalada de generación eléctrica [MW; %]. Fuente: (OLADE - Anuario de Estadísticas Energéticas, 2017)

En el caso de Cuba, Guerra (2016) expresa que actualmente es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce el 4,3% de la electricidad

del país donde la biomasa alcanza el 3,5%, aunque existen un importante número de opciones para la utilización de estas fuentes renovables, particularmente la eólica y la fotovoltaica.

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

- Transformar la estructura de las fuentes energéticas empleadas en la generación y el consumo de electricidad, incrementando la participación de las FRE.
- Disminuir la dependencia de los combustibles fósiles de importación.
- Elevar la eficiencia en la generación y en el consumo de la electricidad, logrando la reducción de los costos del kWh entregado por el Sistema Energético Nacional (SEN).
- Elevar la sustentabilidad medioambiental y reducir la contaminación.

El programa para cumplir los objetivos propuestos contempla:

- ✓ Incrementar la participación de las FRE en la generación eléctrica hasta un 24%.
- ✓ Producir 7 316 GWh/año con FRE.
- ✓ Sustituir 1,75 millones de toneladas de combustible/año.
- ✓ Dejar de emitir a la atmosfera 6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

La Figura I.6 muestra según Hernández (2018) como se encuentra la situación de las energías renovables en el presente y como se esperan para el año 2030, logrando un incremento de la eficiencia energética que es una necesidad y además una oportunidad de inversión fundamentalmente en la industria azucarera.

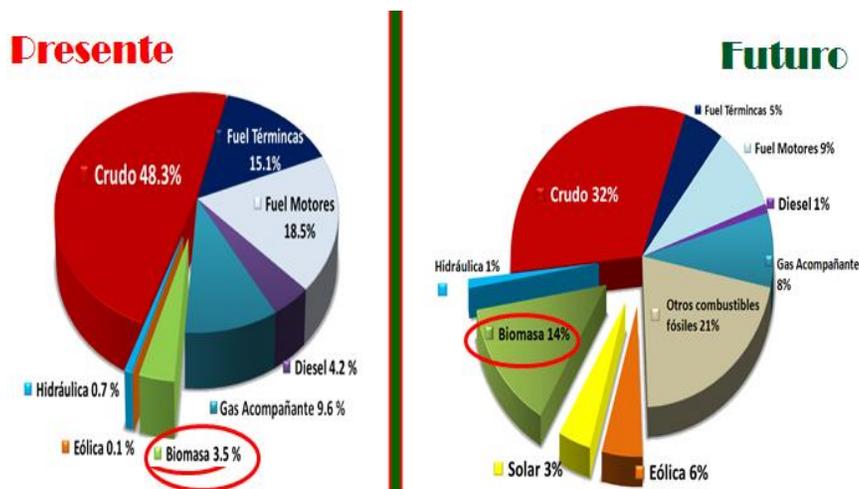


Figura I.6 La generación con fuentes renovables de energía es una prioridad para Cuba. Fuente: (Hernández, 2018).

Sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico y diversos autores como Gielen, Boshell, Saygin, Bazilian, Wagner & Gorini (2019) son del criterio de que la energía renovable puede suministrar dos tercios de la demanda energética mundial, y contribuir en la reducción de los gases de efecto invernadero (GHG en inglés), lo cual constituye una necesidad en un periodo de tiempo hasta el 2050 para limitar el incremento promedio de la temperatura de la superficie por debajo de 2 °C; algo en lo que concuerda la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA,2018), la cual expresa que la transición hacia las fuentes renovables de energía no está sucediendo lo suficientemente rápido: tras tres años de constante emisión de CO<sub>2</sub> desde 2014 hasta el 2016, se ha estado rozando en 2017 el 1,4%, a pesar de que una cuarta parte de toda la electricidad mundial fue producida por energía renovables en 2017.

Según Yamakawa, Qin & Mussatto (2018) el sector de energía renovable, por ejemplo, el cual incluye la solar fotovoltaica, la bioenergía, las hidroeléctricas y la energía eólica, entre otras, ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, atrayendo a más inversores y creando nuevos puestos de trabajo. Acorde a la IRENA el sector de energía renovable mundial ha dado empleo a alrededor de 10,34 millones de personas en 2017, un 45% más alto de lo alcanzado en 2012 (Figura I.7).

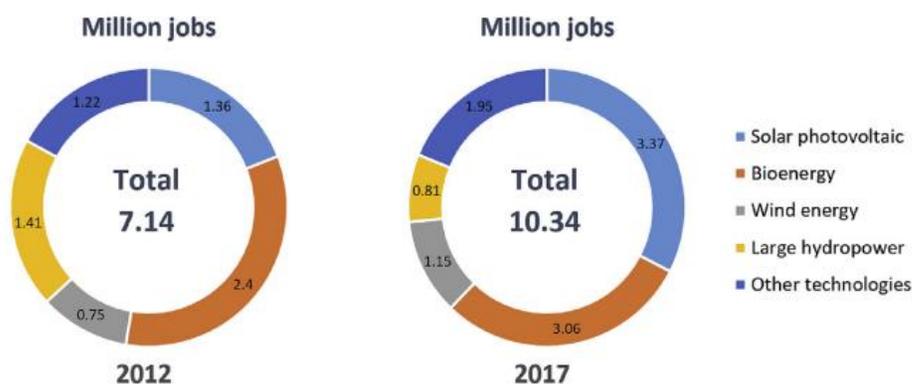


Figura I.7 Cantidad de empleos generados por las tecnologías renovables de energía en el periodo 2012-2017. Fuente: (IRENA,2018)

Como hemos podido apreciar estas energías renovables presentan características que mitigan tanto el impacto ambiental en el planeta como las limitaciones de abastecimiento, además de disminuir la dependencia energética, presentar un carácter más local de uso, declinar la dependencia a la importación de combustibles fósiles y reducir su coste de transporte. Son crecientemente competitivas, su coste por kWh cada vez se acerca más al aquel extraído por combustibles fósiles o energía nuclear, incluso en ciertos casos es más económico. Por último, presentan un horizonte político favorable, la comunidad internacional entiende la obligación de reducir la degradación medioambiental del planeta a través de una transición hacia energías renovables y esto reflejado en un marco político que impulsa las fuentes energéticas limpias (van Hal, 2017). La Figura I.8 muestra un desglose geográfico del aumento en la capacidad renovable de generación de electricidad para el período 2018-2050. China como gran productor y consumidor de energía cuenta con más de un tercio, seguida por los Estados Unidos, India y la Unión Europea.

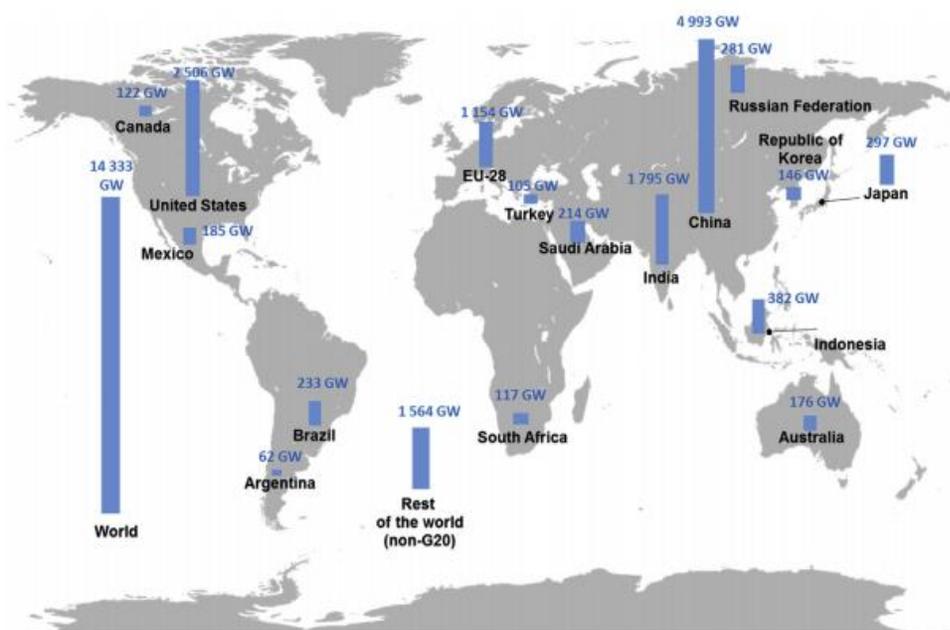


Figura I.8 Desglose geográfico del aumento en la capacidad renovable de generación de electricidad 2018-2050. Fuente: (IRENA,2018)

### I.3 Biomasa. Ciclo y proyección

En orden de garantizar un suministro de energía seguro, nuevos modelos de energía se están desarrollando acorde a lo renovable, sustentable, eficiente y sistemas rentables. Entre las fuentes renovables, la biomasa se define como materia orgánica proveniente de diferentes plantas, agrícolas, industriales y residuos urbanos. Esta es caracterizada por su gran potencial que puede ser utilizado para producir energía térmica, electricidad y biocombustibles. Esta fuente de energía muestra ventajas importantes, incluyendo su contribución en el desarrollo económico y social de los países y regiones donde es producida, también por la reducción de la disposición de residuos y las emisiones de CO<sub>2</sub>, entre otros beneficios (Agrela, Cabrera, Morales, Zamorano & Alshaaer, 2019).

Con razón pudiéramos pensar que la combustión de biomasa produce CO<sub>2</sub>, también como vapor de agua y monóxido de carbono (CO), etc. Sin embargo, la biomasa es considerada como "neutral" dentro de los ciclos del carbono, lo que no rompe el equilibrio de la concentración de carbono en la atmósfera (Agrela et al., 2019), es decir que a diferencia de los combustibles fósiles, las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la combustión de la biomasa se consideran como neutral (Figura I.9); algo que corroboran Bilandzija et al.

(2018), los cuales expresan que la biomasa como fuente de energía renovable es casi neutral con las emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que una sustitución del carbón por biomasa conllevaría a alcanzar un decrecimiento de un 93% en las emisiones netas de CO<sub>2</sub> por unidad de valor calórico.

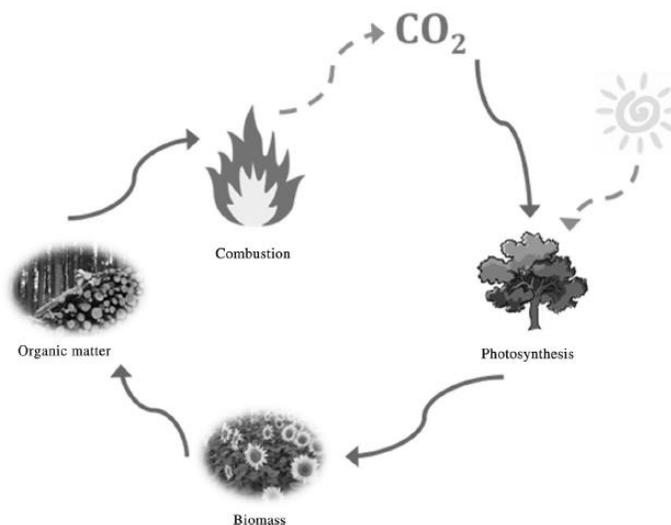


Figura I.9 Ciclo de biomasa. Fuente:(Agrela et al., 2019)

Para asegurarse que la biomasa es parte de la solución en la futura planeación energética la Agencia Internacional de Energía (IEA en inglés) ha provisto un incremento significativo para los próximos años, estimando que para el 2050 el potencial de producción de biomasa estará en el rango de 100-300 EJ (2 300-7 100 Mtoe) por año, comparado con el actual 50 EJ (IEA, 2012). Particularmente se espera que para esos entonces la biomasa en la Unión Europea contribuya cerca del 50% de sus objetivos de energía renovable (IEA, 2012). En un futuro más cercano se espera que la demanda de conversión de biomasa en energía para dicha comunidad política de derecho se incremente desde la actualidad 5,7 EJ yr<sup>-1</sup> hasta 10,0 EJ yr<sup>-1</sup> en 2020 (Bilandzija et al., 2018), con una producción de calor y potencia que alcance el 45% del uso de la energía renovable (Bajwa, Peterson, Sharma, Shojaeiarani & Bajwa, 2018).

#### **I.4 Proceso o ciclo de trabajo de la biomasa cañera**

La naturaleza orgánica de los coproductos y subproductos del procesamiento de la caña de azúcar y las cantidades generadas cada temporada (zafra) son sus ventajas de



animal y potencialmente puede convertirse en la materia prima que garantice el desarrollo de diversas producciones, sirviendo, así como abono natural del suelo. Se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima.

La cachaza que se puede definir como el residuo en forma de torta que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña, durante la fabricación de azúcar crudo (García, 2017). La cachaza se utiliza principalmente como fertilizante en los campos de caña de azúcar, lo que da lugar a una fertilización excesiva de los campos de caña, con serias implicaciones en el suelo. Otra de las aplicaciones de la cachaza es la extracción de cera con solventes orgánicos, para sustituir diferentes tipos de ceras naturales y derivadas del petróleo. También se han realizado estudios para determinar las posibilidades de obtener de la cachaza: aceites y resinas (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019). En vista de su disponibilidad y características, la cachaza también es adecuada para la combustión en los hornos.

La paja de caña, constituida por la vaina y las hojas secas, tiene una estructura muy diferente a la del cogollo. Para fines de alimentación animal, la paja con las vainas constituye la fracción menos asimilable, pero es la más interesante desde el punto de vista de utilización energética. El empleo de la paja para la producción de energía, por sus ventajas como recurso renovable, ha sido siempre motivo de preocupación para investigadores y especialistas, además de constituir un tema latente de investigación. Con la finalidad de incrementar el valor natural de estos residuos puede implementarse la clasificación de estos en fracciones (secas y verdes según el propósito) y brindar un subsiguiente y adecuado tratamiento químico o físico y mezclado con otros productos para incrementar su valor nutricional. Un aspecto importante a considerar, consiste en que se pueden conseguir por esta vía, en plena etapa de sequía, grandes cantidades de materia verde capaz de ser asimilada por el ganado y evitar la depauperación del mismo en este período. Una opción económicamente atractiva la constituye la utilización de la paja de la caña para la obtención de sustrato en el cultivo de hongos comestibles y al

final del proceso productivo contar con un forraje beneficiado y enriquecido para el ganado. (García, 2017)

### I.5 Potencial de biomasa en el mundo y en Cuba

La bioenergía puede encontrarse de diversas maneras en la presente y futura demanda energética mundial debido a que posee un potencial enorme. En efecto el acceso a la energía es un requisito previo del desarrollo económico y social porque virtualmente cualquier actividad productiva necesita energía como entrada (Mboumboue & Njomo, 2018).

La bioenergía posee un importante aporte al suministro de energía primaria siendo el mayor participante en la oferta mundial con respecto a los demás renovables, para el 2015 la biomasa aportaba el 14,1% en el consumo final de energía, evidenciando desde el año 2010 un crecimiento del 2% anual en la generación eléctrica pese a los grandes retos impuestos por el mercado debido a las deficientes políticas en algunos campos de la industria y por los bajos precios del petróleo. Como se observa en la Figura I.11, la biomasa no solo tiene participación en el sector eléctrico, prosperando en otras áreas al satisfacer también la demanda energética del sector transporte y la producción de calor para edificios e industrias.

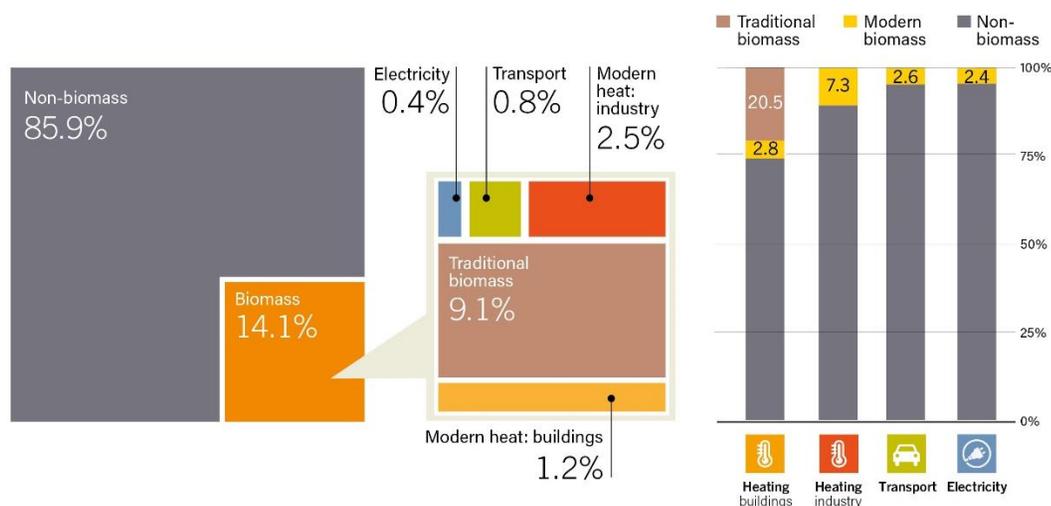


Figura I.11 Participación de la biomasa en el consumo total final de energía y en el consumo final de energía por sector de uso final, 2015. Fuente: (Douglas, 2018)

En Cuba según el Ministerio de la Agricultura (MINAG, 2018) el potencial de la biomasa es amplio, debido a que se cuenta con 26 000 t de residuos de las industrias de arroz y la poda de las plantaciones de cítricos, 230 000 t de maderable no utilizado del manejo de los bosques, plantaciones existentes y aprovechamiento de los residuos de las industrias forestales, en el caso del marabú se registran 731 633,33 hectáreas con infestación pesada y media de marabú, la cual posee una densidad de entre 600 y 1 190 kg/m<sup>3</sup>, con un crecimiento de hasta 7 m de altura y alta dureza y solidez, con un período de servicio de 50 años. Además, el marabú es un excelente combustible debido a su bajo contenido de humedad (22% de humedad de almacenaje, en el extremo inferior del rango para una astilla secada al aire) y se estima que en 1,5-2 m de hectáreas tenga un rendimiento promedio de 70-90 t/h (MacDonald, 2018). Por lo tanto, se ha estimulado al desarrollo de este recurso con la implementación de las 10 primeras cosechadoras después de completar con éxito los ensayos preliminares y la logística de marabú ahora se establece como una unidad de negocio separada y cumple con los pedidos de biomasa del país mientras se perfeccionan las técnicas de cosecha.

El caso del biogás también presenta un alto potencial en nuestro país, existen 139 granjas estatales, 7 864 convenios porcinos y 1 999 vaquerías con un combustible equivalente a 241 782 t/año, para una producción de electricidad de 807 552 MWh/año con una potencia de 101 MW (MINAG, 2018).

Para poder explotar los recursos de la biomasa es necesario según MINAG (2018):

- Lograr una penetración en la matriz energética del MINAG superior al 25 %.
- Propiciar la sostenibilidad de los procesos de las cadenas de producción agropecuarias.
- Disponer de fuentes de financiamiento a mediano y largo plazo que permitan efectuar los pagos con el rendimiento de la inversión.
- Independencia energética de nuestras cadenas productivas ante las afectaciones que pueda tener el sistema electro energético nacional.
- Aprovechamiento energético de los sistemas de tratamiento de residuales en los procesos productivos agroindustriales.

- Mitigación del impacto ambiental logrando productos sanos.
- El desarrollo rural, por la creación de empleos, la capacitación de los productores y un impacto directo en la mejora de sus condiciones de vida.

Debido a esto Cuba se encuentra inmersa en un programa con vistas al desarrollo de las fuentes renovables de energía y de la eficiencia energética. Según Hernández (2018) la biomasa cañera cuenta con una capacidad instalada de 470 MW en 57 centrales azucareros, 0,82 MW instalados en 5 plantas de biogás, así como 0,50 MW para el aprovechamiento en 4 plantas de biomasa no cañera, por lo que sobre esta fuente se encuentra enmarcada la utilización actual de las FRE. La política aprobada por el estado cubano en el 2014 prevé la instalación de 25 bioeléctricas distribuidas por todo el país con una capacidad de 872 MW de alta eficiencia que de conjunto con el resto de los ingenios propiciarían:

- ✓ Generar 4262 GWh
- ✓ Sustituir 952 mil t de combustibles fósiles
- ✓ Evitar emisiones de CO<sub>2</sub> anuales en el orden de 3,6 millones de toneladas

La provincia de Cienfuegos tendría participación con la bioeléctrica "5 de Septiembre" para una capacidad a instalar de 60 MW mediante una inversión extranjera.

### **I.6 Estimación de la biomasa con propósitos energéticos**

La literatura cuenta con numerosos estudios relacionados con la estimación de la biomasa y su utilización con fines energéticos. Douglas (2018) expresa que la biomasa representó el 14% del consumo total de energía para la producción de calor en el 2015 jugando un papel importante en la considerada por algunos autores como "la cenicienta" de las políticas renovables.

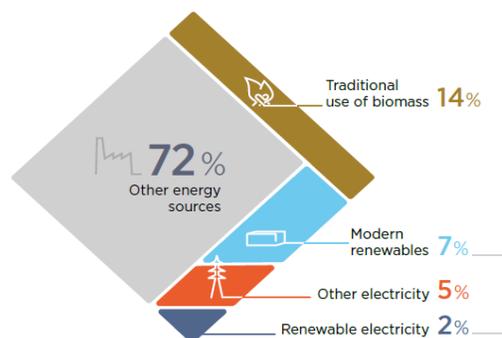


Figura I.12 Consumo global de energía para la producción de calor, 2015. Fuente:(Douglas, 2018)

Toklu (2017) determina el potencial de energía total de biomasa en Turquía en alrededor de 33 Mtoe, donde el potencial de biomasa utilizable es de 17 Mtoe. Ferreira, Monteiro, Brito & Vilarinho (2017) proponen el alcance, potencial y tecnologías relacionadas con el uso de las fuentes de biomasa en Portugal. La situación actual de los recursos biomásicos muestra que el potencial total estimado para varios sectores de ese país es de 42 489,7 GWh/año.

Gabisa & Gheewala (2018) evalúan el potencial de producción de energía proveniente de biomasa en Etiopía. El total de bioenergía disponible fue estimado de 750 PJ por año (46,5% de residuos forestales, 34 % de residuos de cosecha, 18,8% de desechos de ganado y 0,05 % de residuos sólidos municipales). En su investigación los autores destacan que la biomasa es considerada como la columna vertebral de las fuentes de energía en países en desarrollo, especialmente en países subsaharianos como Etiopía, y que a nivel mundial la participación (*share* en inglés) de la biomasa como energía es estimada sobre el rango de 9-15%.

Para Bilandzija et al. (2018) la energía generada a partir de la producción de biomasa es actualmente la cuarta fuente de energía más empleada en la Unión Europea, después de la energía nuclear, otros tipos de energía renovable y la proveniente de combustibles fósiles. Comparada a la producción primaria de fuentes renovables en la Unión Europea, la biomasa tiene la mayor cantidad de *share*, aproximadamente 63,11% (123,592 ktoe), y es seguida por la energía hidráulica con 16,46% (32,242 ktoe) y la energía eólica con 11,11 % (21,768 ktoe).

Según Jin & Sutherland (2018) la bioenergía representa una porción significativa del total de energía renovable que es generada. Actualmente, 7-10% de la energía mundial es proporcionada por la energía producida a través de la biomasa. El Departamento de Energía de los Estados Unidos reporta que cerca del 10% del consumo energético es derivado de fuentes de energía renovable y en 2014 la biomasa representó el 50% de la carpeta energética renovable en ese país. Acorde a datos aportados por la EIA la biomasa y los gases derivados de esta produjeron cerca de  $1,4 \times 10^{12}$  MJ, y proporcionaron cerca de  $2,3 \times 10^{11}$  MJ de electricidad a través de todos los sectores en 2015.

La generación total de residuos sólidos se espera que se incremente desde 1,2 billones de Mg en 2010 a alrededor de 2,2 billones de Mg en 2025. Asumiendo un valor calórico inferior promedio (LHV en inglés) de 9000 kJ/kg, se estima que el potencial de energía proveniente de residuos será de 13-30 EJ (Di Maria, Sisani & Contini, 2018).

La producción de residuos sólidos municipales (MSW por sus siglas en inglés) en Omán alcanzó los 1,5 millones de toneladas en el año 2012 y se espera que se eleve a 1,89 millones de toneladas en 2030 (Oman Enviromental Services Holding Company, 2016). Para la generación térmica y eléctrica alrededor de 40 millones de toneladas de MSW se incineran anualmente en Europa, mientras que en todo el mundo 130 millones de toneladas de MSW se queman anualmente (Nixon et al., 2013).

Ozturk et al. (2017) reflejan que la producción anual de desechos en Turquía es de 30 Mton. Turquía además produce 1,5 Mton de biodiesel, 3 Mton de bioetanol, y de 2,5 - 4,0 billones de m<sup>3</sup> de biogás al año. Hossen, Sazedur, Kabir, Hasan & Ahmed (2017) presentan una valoración objetiva de la biomasa disponible como una fuente prominente de energía y sugieren este potencial como una fuente de energía primaria sostenible que eventualmente puede reemplazar la utilización de combustibles fósiles a largo plazo.

Estos estudios no presentan en la mayor parte de los casos un enfoque de manera integral, ya que centran solamente en la estimación estadística del total de biomasa disponible y de su potencial energético. Es decir, las metodologías analizadas por su

parte no evalúan el proceso desde la sostenibilidad, y además de no reflejar indicadores tradicionales tampoco enfatizan en el análisis la perspectiva desde la economía ecológica.

### **I.7 Métodos para el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA)**

La toma de decisiones en estos momentos está considerando una serie de aspectos como son el complejo social, económico, tecnológico y los factores ambientales, que antes no se tomaban en cuenta (Cristóbal, 2010). Dentro de este marco las técnicas para la toma de decisiones multi-criterios (MCDM en inglés) están ganando popularidad en el desarrollo y gestión de la energía sostenible. Dichas técnicas proporcionan soluciones a los problemas que involucran conflictos y múltiples objetivos. Estos métodos basados en promedios ponderados, establecer prioridades, clasificación externa, principios difusos y sus combinaciones se emplean para las decisiones de planificación energética.

Los métodos MCDM o métodos para el análisis de decisión multicriterio (MCDA) tratan el proceso de toma de decisiones en presencia de múltiples objetivos. Se requiere de un decisor para elegir entre criterios cuantificables o no cuantificables y múltiples. Los objetivos suelen ser conflictivos, y por lo tanto, la solución depende en gran medida de las preferencias de quien toma las decisiones. En la mayoría de los casos, en el proceso participan diferentes grupos de tomadores de decisiones. Cada grupo trae diferentes criterios y puntos de vista, que deben ser resueltos dentro de un marco de entendimiento y compromiso mutuo. (Pohekar & Ramachandran, 2004)

#### **I.7.1 Visión general de los métodos para la toma de decisiones multi-criterios**

Dentro de las técnicas MCDA para la toma de decisiones se encuentran la toma de decisiones multi-objetivo (MODM) y la toma de decisiones multi-atributo (MADM) (Pohekar & Ramachandran, 2004). Hay varios métodos en cada una de las categorías anteriores. Cada método tiene sus propias características y también pueden clasificarse como deterministas, estocásticos o difusos. Puede haber combinaciones de los métodos anteriores. Dependiendo del número de tomadores de decisiones, estos pueden ser clasificados como métodos de toma de decisiones individuales o grupales. La toma de

decisiones bajo la incertidumbre y los sistemas de apoyo a las decisiones también son técnicas destacadas de toma de decisiones. El proceso de decisión multi-criterio es como se muestra en la Figura I.13. Los diferentes métodos se describen a continuación.

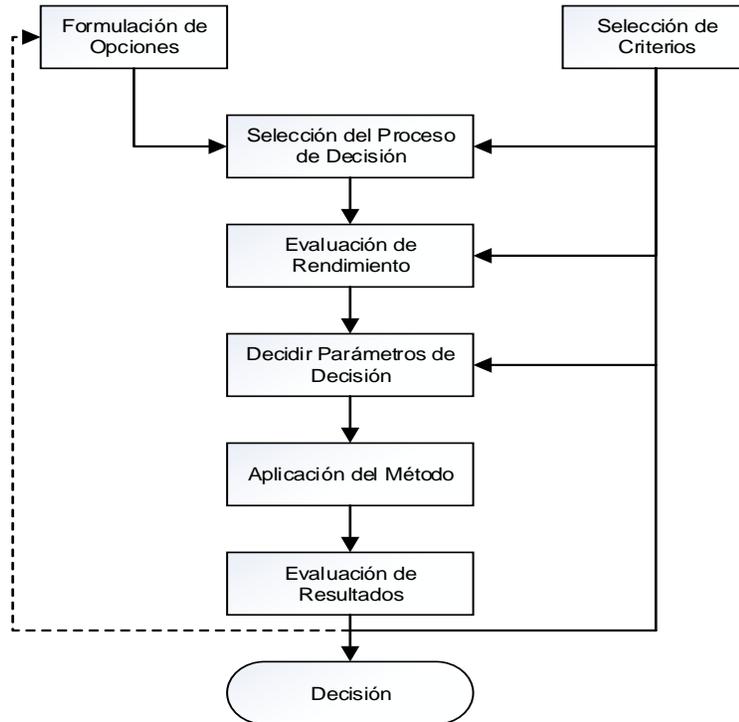


Figura I.13 Proceso de decisión multicriterio. Fuente: (Pohekar & Ramachandran, 2004)

### I.7.2 Técnicas de MCDA y proyectos energéticos renovables

Las áreas de aplicación de MCDA presentadas en esta sección son la planificación de energías renovables, la asignación de recursos energéticos, la planificación de proyectos energéticos, entre otras áreas. La planificación de energías renovables y la asignación de recursos energéticos se refiere a la compilación de un plan energético viable y a la difusión de diversas opciones de energías renovables. Los factores claves aplicables son: la planificación de inversiones, la planificación expansiva de la capacidad energética y la evaluación de alternativas energéticas. La planificación de proyectos se refiere a la selección del sitio, la selección de la tecnología y el respaldo a la decisión en proyectos de aprovechamiento de energías renovables. Otras aplicaciones incluyen selección de plantas desalinizadoras y la gestión de residuos sólidos. Según Cristóbal (2010) los

métodos MCDM comúnmente aplicados a los proyectos de energía renovable son la optimización multi-objetivo, AHP, PROMETHEE, ELECTRE, MAUT, métodos difusos y los sistemas de apoyo a la decisión (DSS). La Tabla I.1 muestra las áreas de aplicación de estos métodos en proyectos de energía renovable.

Tabla I.1 Áreas de aplicación de los métodos multicriterios en proyectos de energía renovable.  
Fuente: (Cristóbal, 2010)

Método	Área de aplicación
Toma de decisiones multi-objetivo (MODM)	Planeación energética renovable y planeación económica de energía renovable
Sistemas de apoyo a la decisión (DSS)	Planeación energética renovable
Proceso de jerarquía analítica (AHP)	Planeación energética renovable y proyectos de parques eólicos
PROMETHEE	Proyectos geotérmicos y selección de sitios hidroeléctricos
ELECTRE	Planeación energética renovable
Teoría de la utilidad multi-atributo (MAUT)	Proyectos de energía solar y planeación energética renovable
Programación difusa	Selección de sitios eólicos y sistemas solares

En el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) desarrollado por Saaty (1980) un problema de criterios múltiples está estructurado jerárquicamente por el desglose de este en partes consistentes cada vez más pequeñas. El objetivo (*goal* en inglés) se encuentra en la parte superior de la jerarquía, los criterios y sub-criterios a niveles y sub-niveles de la jerarquía respectivamente, y las alternativas de decisión en la parte inferior de la jerarquía (Saaty, 2000). La mejor alternativa usualmente se selecciona al hacer comparaciones entre alternativas con respecto a cada atributo. Este tipo de método es muy utilizado en la planificación de energía renovable para la clasificación de las fuentes renovables de energía en países como Pakistán (Amer & Daim, 2011), Malasia (Ahmad & Tahar, 2014) y Arabia Saudita (Al Garni, Kassem, Awasthi, Komljenovic & Al-Haddad, 2016); además suele ser utilizado en proyectos para la selección de sitios con potencial eólico (Aras, Erdogmus & Koc, 2004; Lee, Chen & Kang, 2009) debido a las disposiciones que posee de convertir un problema complejo en una jerarquía simple, viable e intuitivamente atractiva, su capacidad para combinar criterios cualitativos y cuantitativos en el mismo marco de decisión y el uso de ayudas computacionales conducen a decisiones exitosas en la mayoría de sus dominios (Saaty & Vargas, 2012).

El Método Organizativo de Clasificación de Preferencias para la Evaluación de Enriquecimiento (PROMETHEE) utiliza el principio de superación para clasificar las alternativas, combinado con la facilidad de uso y la menor complejidad. PROMETHEE realiza una comparación por pares de alternativas con el fin de clasificarlas con respecto a una serie de criterios. El método se ha utilizado en proyectos geotérmicos (Goumas, Lygerou & Papayannakis, 1999; Goumas & Lygerou, 2000; Haralambopoulos & Polatidis, 2003) y para la selección de sitios con potencial hidroeléctrico (Mladineo, Margeta, Brans & Mareschal, 1987), además de emplearse para examinar posibilidades de desarrollo en el sector eléctrico en países como Grecia (Diakoulaki & Karangelis, 2007).

El Método de Eliminación y Elección Traduciendo la Realidad (ELECTRE) es capaz de manejar criterios discretos de carácter cuantitativo y cualitativo, además de proporcionar un orden completo de las alternativas. El problema debe formularse de tal manera que se elijan las alternativas que se prefieran sobre la mayoría de los criterios y que no causen un nivel "inaceptable de descontento" para ninguno de los criterios analizados. Basados en la concordancia, los índices de discordancia y los valores umbrales se desarrollan los gráficos para relaciones fuertes y débiles. Estos gráficos son utilizados en un procedimiento iterativo para obtener el ranking de alternativas. Las principales aplicaciones de este método se encuentran en la planificación energética renovable (Georgopoulou, Lalas & Papagiannakis, 1997; Beccali, Cellura & Mistretta, 2003), aunque se recomienda su uso en problemas de toma de decisiones con pocos criterios y un gran número de alternativas (Pohekar & Ramachandran, 2004). Por otra parte Goletsis, Psarras & Samouilidis (2003) proponen un enfoque híbrido PROMETHEE – ELECTRE para clasificar proyectos del sector energético en Armenia.

La Teoría de la Utilidad Multi-Atributo (MAUT) toma en consideración las preferencias de los tomadores de decisiones en la forma de la función de utilidad, la cual se define sobre un conjunto de atributos. Es decir, MAUT está desarrollado para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a asignar valores de utilidad, para alcanzar resultados mediante la evaluación de estos en términos de atributos múltiples y combinando estas asignaciones individuales para obtener valores generales de utilidad

(Cristóbal, 2010). En la revisión de la literatura se observa que MAUT no se utiliza mucho en la planificación energética, esto puede ser debido a los requerimientos que impone el método para la formulación de la función utilidad y a la complejidad de calcular las constantes escalares mediante algoritmos (Pohekar & Ramachandran, 2004). La selección de proyectos de energía solar (Golabi, Kirkwood & Sicherman, 1981) y la planificación energética renovable (Jones, Hope & Hughes, 1990) son las principales aplicaciones identificadas en la literatura. Diversos autores coinciden en que en una poca variedad de estudios se observa el uso de este método después de 1990.

El método TOPSIS (Técnica de Preferencia de Orden por Similitud para Soluciones Ideales) es desarrollado por Huang & Yoon (1981) como una alternativa a ELECTRE. El concepto básico de este método es que la alternativa seleccionada debería tener la distancia más corta desde la solución ideal en sentido geométrico. El método asume que cada atributo tiene un incremento monótono o una utilidad decreciente, lo que facilita la localización de las soluciones ideales y de las soluciones ideales negativas. Por lo tanto, el orden de preferencia de las alternativas se obtiene comparando las distancias euclidianas. Primeramente, se formula una matriz de decisión con  $M$  alternativas y  $N$  criterios. Posteriormente se lleva cabo la conformación de la matriz de decisión ponderada y de la matriz de decisión normalizada. Luego se procede a la determinación de las soluciones ideales y de las soluciones ideales negativas. Para criterios de beneficios el tomador de decisiones quiere tener el máximo valor entre las alternativas y para los criterios de costo quiere obtener valores mínimos entre las alternativas. Esto es seguido por una medida de separación y por el cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal. La mejor alternativa es la que tiene la distancia más corta a la solución ideal y la más larga a la solución ideal negativa (Pohekar & Ramachandran, 2004). Streimikiene, Balezentis, Krisciukaitiene & Balezentis (2012) emplean el método TOPSIS para priorizar tecnologías renovables de producción de electricidad.

El Método de Clasificación Comprometida (VIKOR) como el método TOPSIS se basa en una función de agregación que representa la "cercanía al ideal" que se origina en el método de programación de compromiso. Estos dos métodos introducen diferentes

formas de función de agregación para su clasificación y diferentes tipos de normalización para eliminar las unidades de la función criterio. Mientras que el método VIKOR utiliza la normalización lineal y los valores normalizados no dependen de la evaluación unitaria de un criterio, el método TOPSIS utiliza la normalización del vector, y el valor normalizado podría ser diferente para la evaluación unitaria de un criterio particular. Respecto a la función de agregación, el método VIKOR introduce una función de agregación que representa la distancia desde la solución ideal, considerando la importancia relativa de todos los criterios, y un equilibrio entre la satisfacción total e individual (Kaya & Kahraman, 2010). Por otro lado, el método TOPSIS introduce una función de agregación que incluye las distancias desde el punto ideal y desde el punto negativo-ideal sin considerar su importancia relativa (Yang et al., 2018). Sin embargo, el punto de referencia podría ser la mayor preocupación en la toma de decisiones, y ser lo más cercano posible con el ideal es la razón de la elección humana. Cristóbal (2010) emplea una metodología integrada VIKOR-AHP para la selección de proyectos de energía renovable en España. El proceso de jerarquía analítica lo utiliza para ponderar la importancia de los criterios involucrados en el proceso, basado en las preferencias de los tomadores de decisiones.

Otras herramientas de toma de decisiones utilizadas en proyectos de inversión en FRE son la Programación de Compromiso (CP), la cual define la mejor solución como la del conjunto de soluciones eficientes cuyo punto está a la menor distancia posible de la solución ideal. El Método de la Suma Ponderada (WSM) es normalmente el enfoque más utilizado, especialmente en problemas de dimensiones unitarias. El Método de Producto Ponderado (WPM) es muy similar al WSM. La principal diferencia es que en lugar de la suma en el modelo hay multiplicación. Cada alternativa se compara con las otras multiplicando un número de razones, una para cada criterio. Cada razón es elevada a la potencia equivalente del peso relativo para el criterio correspondiente. (Pohekar & Ramachandran, 2004)

### **I.8 Sostenibilidad de la biomasa con fines energéticos**

El modelado de políticas energéticas necesita de una consideración explícita de múltiples objetivos en los que se puedan conocer adecuadamente las partes interesadas y los criterios sostenibles, para que no fracasen en términos de sostenibilidad y aceptación.

Según Pérez-Martínez, Contreras-Moya & Pérez (2010) uno de los métodos novedosos para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales generados por productos y procesos, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En su artículo utilizan dicha metodología como una herramienta valiosa para evaluar el desempeño ambiental de la producción de azúcar en la empresa azucarera Panchito Gómez Toro, comprobando científicamente que la mayor contribución al impacto del proceso está dada por la etapa agrícola y en ésta, por el uso de la tierra, la producción y uso de fertilizantes químicos y combustibles, mientras que el mayor impacto en la etapa industrial está dado por la cogeneración de electricidad con bagazo, producto de la emisión de material particulado. Por otro lado, Giuntoli et al. (2016) utilizan la evaluación del Análisis del Ciclo de Vida Atribucional (A-LCA en inglés) para analizar el potencial de mitigación del cambio climático de tres plantas que utilizan biomasa residual comparado con otras que utilizan combustibles fósiles en la Unión Europea.

Kaya & Kahraman (2010) emplean una metodología integrada VIKOR-AHP para determinar la mejor alternativa de energía renovable para Estambul. En la metodología VIKOR-AHP propuesta, los pesos de los criterios seleccionados fueron determinados por la comparación matricial por pares tal y como se realiza en el AHP. Los autores destacan que en los problemas energéticos de toma de decisiones los juicios de los tomadores de decisiones son usualmente imprecisos debido a que es relativamente difícil para estos proporcionar valores exactos a los criterios, por lo que los datos para la evaluación de las políticas energéticas alternativas deben estar expresados en términos lingüísticos. De acuerdo al modelo esta clase de incertidumbre en las preferencias humanas provoca que se aplique la lógica difusa exitosamente. La originalidad de este estudio proviene de la propuesta de modificar el procedimiento clásico de ponderación de la metodología VIKOR

mediante el uso de la comparación matricial por pares difusa. En el Anexo 1 se resumen los criterios más utilizados en la planeación energética.

Perpiña, Martínez-Llario & Pérez-Navarro (2012) evalúan en un sistema de información geográfica (*GIS environments* en inglés) el emplazamiento de plantas de biomasa utilizando un proceso de jerarquía analítica (AHP) para ponderar los criterios principales. Un total de 13 factores fueron comparados, incluyendo cinco ambientales, seis económicos y dos sociales. Los autores destacan que la correcta selección de los criterios de evaluación tiene un efecto considerable en todo el proceso de evaluación y los resultados pueden ser sesgados por la inclusión o exclusión de ciertos criterios. Las mejores alternativas se obtuvieron después de aplicar las dos reglas de decisión: la suma lineal ponderada (WLS) y el método del punto ideal (IPM).

Aguilar-Rivera (2014) determina un índice de diversificación de las zonas de abasto cañero y de las fábricas de azúcar de México mediante la metodología multi-criterio de Proceso Analítico Jerárquico (AHP), incorporando criterios tecnológicos y socioeconómicos relacionados con el balance material y energético de las fábricas de azúcar y sus derivados. Por otra parte, Rahman, Paatero, Lahdelma & Wahid (2016) presentan una técnica metodológica para ayudar a formular, evaluar y promover la política energética de un país de manera transparente y representativa con justificaciones científicas claras y evaluaciones equilibradas. Para ello utilizan la herramienta SMAA (Análisis Estocástico Multicriterio de Aceptabilidad), que puede evaluar diferentes alternativas incorporando múltiples criterios, con el fin de examinar las preferencias de los diferentes elementos de la política.

Michailos et al. (2016) realizan un estudio basado en la evaluación consistente y comparativa de la exergía total, eficiencia ambiental y financiera de dos tecnologías para la conversión de biomasa en combustibles (*biomass to fuels* en inglés). Los autores utilizan el software MATLAB para modelar la reacción cinética de cada proceso. Basado en simulaciones, termodinámicas (análisis exergético), económicas (análisis de riesgo) y ambientales (emisiones de CO<sub>2</sub>) se llevan a cabo las evaluaciones. El análisis exergético y económico favoreció la producción de gasolina a partir de metanol (MTG), mientras que

el butanol produce menos emisiones de CO<sub>2</sub>. El estudio concluye con un análisis de decisión multicriterio (MCDA) que permite la posibilidad de comparar sobre la misma base los procedimientos investigados. Acorde a este análisis la producción de gasolina archiva una puntuación general superior a la producción de butanol, i.e. 97% y 90% respectivamente. En la Figura I.14 se puede observar la síntesis de este estudio.

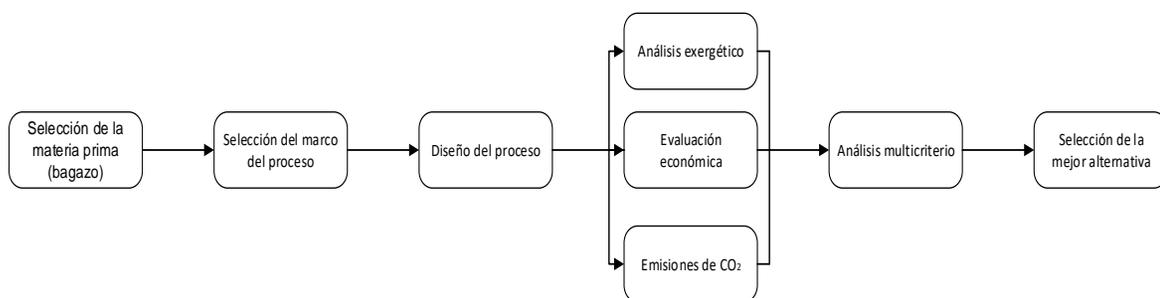


Figura I.14 Desarrollo del marco integrado para evaluar la factibilidad de la utilización del bagazo. Fuente: (Michailos et al., 2016)

Rojas (2017) en aras de fomentar una producción integral en el sector agroindustrial de Colombia que permita promover prácticas que protejan el medio ambiente partiendo de la compatibilidad de las tecnologías con los principios del desarrollo sostenible, emplea el método de análisis multicriterio "Scorin". Con dicho método evalúa ocho tecnologías para el tratamiento de la biomasa resultante de las actividades agrícolas (Plátano, papa, naranja, mango, Mezcla de residuos), obteniendo como principal resultado que las alternativas con los máximos puntajes corresponden a procesos biológicos (biometanización, fermentación y gasificación), debido a que estos son más amigables con el ambiente y a que la composición físico-química de la biomasa se ajusta a la requerida por este tipo de tratamientos, los cuales resultan fáciles de comprender y de operar convirtiéndolos en procesos llamativos para los medianos y pequeños agricultores o empresarios.

Puig (2018) presenta una metodología basada en costes físicos o energéticos que permite la evaluación desde el punto de vista energético, exergético y emergético de la biomasa cañera. El autor utiliza el balance emergético para evaluar la sostenibilidad de estas biomásas a través de su contribución al impacto ambiental incorporando

indicadores emergéticos como: razón de renovabilidad, razón de eficiencia emergética, razón de carga ambiental e índice de sostenibilidad emergética.

Yang et al. (2018) en su análisis de priorizar las tecnologías renovables de energía para la calefacción de hogares (*home heating* en inglés) en Dinamarca abarcan aspectos económicos, tecnológicos y ambientales. Los autores emplean el método TOPSIS para clasificar las alternativas asumiendo que la dimensión económica es la principal conductora para la difusión de las fuentes de energía renovables.

Qazi et al. (2018) en sus iniciativas por mejorar el sistema de gestión de residuos en Omán proponen una tecnología óptima para la conversión de residuos en energía (*waste-to-energy* en inglés), utilizando un proceso de jerarquía analítica (AHP). Sobre la base de una encuesta realizada a un comité de expertos encargados de identificar/modificar las opciones de WTE y los factores que afectan su selección, los autores consideran que los criterios más importantes lo constituyen los factores ambientales y económicos con un vector de prioridad local de 0,400 y 0,277 respectivamente, indicando que los criterios ambientales se clasifican en la parte superior de los juicios y que los encuestados están más preocupados por la contaminación (emisiones de GHG y residuos peligrosos) de la tecnología de tratamiento de residuos sólidos que por los criterios técnicos (consumo y producción de energía), económicos (costo total) y sociales (aceptación social).

Según Jin & Sutherland (2018) cada etapa en el ciclo de vida del uso de los residuos forestales tiene consecuencias en términos de tres dimensiones de sostenibilidad: económico, ambiental y social, por lo que desarrollan un modelo de sostenibilidad integrado (ISM en inglés) utilizando métodos dinámicos para sistemas bioenergéticos en Estados Unidos, con el fin de entender los cambios que acarrearían en el sistema bioenergético la influencia de medidas ambientales, el desarrollo económico y los impactos sociales. El modelo predice el rendimiento completo de los residuos forestales cuando son utilizados para la generación de energía. Los autores resumen que la cantidad disponible de residuos forestales proyectados por el ISM es mucho mayor que la demanda necesaria de estos para la generación de electricidad en un periodo superior a los 25 años. Mientras tanto, proponen que los residuos disponibles pudieran ser

utilizados como materia prima alternativa para combustibles, y para la generación de calor en otras industrias.

### **Conclusiones parciales**

1. A partir de una revisión bibliográfica se determinó que existe actualmente a nivel internacional una participación de la biomasa del 14,1 % en el consumo total de energía, existiendo aún casi el 78% de dependencia en los combustibles fósiles. En Cuba es baja la utilización de las fuentes renovables de energía, pues con ellas solo se produce el 4,3 % de la electricidad del país, donde la biomasa representa solo el 3,5 %.
2. Los estudios de estimación de la biomasa no presentan en la mayor parte de los casos un enfoque de manera integral, ya que centran solamente en la estimación estadística del total de biomasa disponible y de su potencial energético. Es decir, las metodologías analizadas por su parte no evalúan el proceso desde la sostenibilidad, y además de no reflejar indicadores tradicionales tampoco enfatizan en el análisis la perspectiva desde la economía ecológica.
3. La formulación política para la sustitución de la energía de los combustibles fósiles por FRE debe ser sobre la base de la decisión multi-criterio. La complejidad de la planeación energética y de los proyectos de energía hacen del análisis multi-criterio una herramienta útil en el proceso de toma de decisiones.
4. Los métodos MCDM comúnmente aplicados a los proyectos de energía renovable son la optimización multi-objetivo, AHP, PROMETHEE, ELECTRE, MAUT, métodos difusos y los sistemas de apoyo a la decisión (DSS).



# Capítulo II

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DE LA BIOMASA

### II.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se propone una metodología que posibilita evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera con fines energéticos. Para esto se procedió al desarrollo de tres balances (energéticos, exergéticos y emergéticos) que constituyeron los principales criterios para la posterior evaluación desde un punto de vista multicriterio de las alternativas de combustión de biomasa cañera existentes en el territorio, en aras de comparar dichas alternativas y poder decidir cuál de estas es la más favorable.

### II.2 Metodología multicriterio para evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera con fines energéticos

La Figura II.1 presenta a partir de un diagrama la metodología a seguir quedando cada una de las etapas de la siguiente manera. Etapa 1: Selección de la materia prima. Etapa 2: Selección del marco del proceso. Etapa 3: Diseño del proceso. Etapa 4: Análisis multicriterio. Etapa 5: Selección de la mejor alternativa.

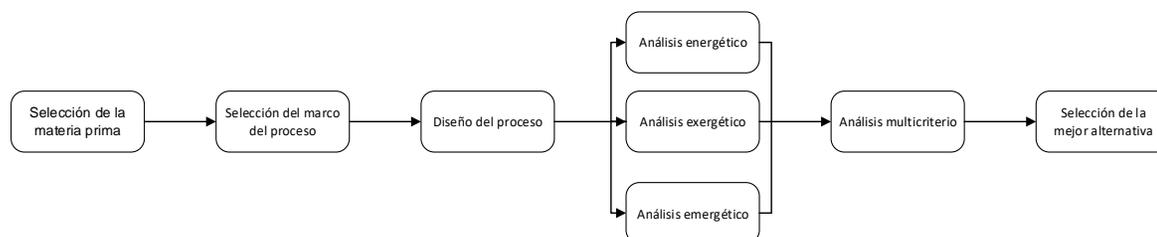


Figura II.1 Metodología propuesta para el análisis de la biomasa como fuente de energía a partir de métodos de decisión multicriterio. Fuente: (Elaboración propia)

### II.3 Metodología para el cálculo de los balances de costes energéticos

La metodología para la evaluación de la biomasa como fuente de energía a partir de balances energéticos, exergéticos y emergéticos representa las tres primeras etapas de la metodología propuesta en el apéndice anterior, por lo que dicha investigación constituye la base para la realización de este estudio. El cálculo de estos balances no solo permitirá determinar indicadores de eficiencia energética, calidad de la energía y

costos exergoeconómicos de la producción de vapor, sino que incorporará indicadores de sustentabilidad a partir de criterios emergéticos. Las etapas con que cuenta la metodología de costes físicos o energéticos se presentan en la Figura II.2.

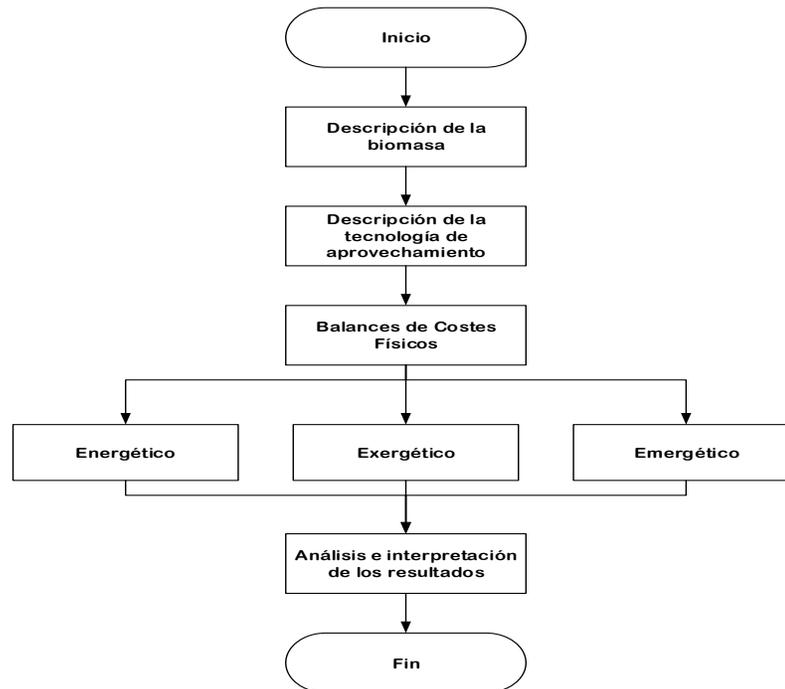


Figura II.2 Metodología de costes físicos o energéticos para el análisis de la biomasa como fuente de energía. Fuente: (Puig, 2018)

### II.3.1 Descripción de la biomasa

La descripción de la biomasa precisa de conocer la composición química de los combustibles sólidos a utilizar, así como las variantes energéticas que regirán las combinaciones entre el combustible base y el adicional. Estos combustibles están formados, fundamentalmente, por cinco elementos químicos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S) y nitrógeno (N), además se encuentran en su composición las cenizas (A) y la humedad (W). Estas últimas forman el lastre externo del combustible, mientras que el oxígeno y el nitrógeno forman el interno (Rodríguez, Rosabal & Martínez, 2000). Los combustibles que serán utilizados en el presente estudio se describen a continuación.

### II.3.1.1 Bagazo.

Según el Manual de los derivados de la caña de azúcar ICIDCA (2000), el bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero, constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista físico, el bagazo integral se compone de 45% de fibra, 2-3% de sólidos solubles y 50% de humedad. Según Rodríguez et al. (2000) para el bagazo integral con 50 % de humedad su masa de trabajo es como se muestra en la Tabla II.1:

Tabla II.1 Composición de la masa de trabajo del Bagazo (%). Fuente: (Rodríguez et al., 2000)

Componentes						
C <sup>t</sup>	H <sup>t</sup>	O <sup>t</sup>	N <sup>t</sup>	S <sup>t</sup>	A <sup>t</sup>	W <sup>t</sup>
23,5	3	22,9	0,065	0,02	0,5	50

### II.3.1.2 Residuos Agrícolas de Cosecha.

Los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) están constituidos por las hojas verdes y secas de la caña y por pedazos de su tallo. Constituyen un combustible renovable cada año y su potencial obteniéndolos en centros de acopio y limpieza de caña es equivalente a 0,12 millones de toneladas de combustible convencional por cada millón de toneladas de azúcar crudo que se produzca. Los RAC ya son empleados en varios países. (ICIDCA, 2000)

En Cuba según Carrasco (2018) se han llegado a utilizar como combustible cerca de 150 000 t en una zafra y sus tres fuentes fundamentales de origen son:

1. Centros de acopio de caña para su procesamiento (corte y limpieza) y trasbordo a carros de ferrocarril.
2. Centros de limpieza donde a la caña se le quita la paja (limpieza) y se trasborda a carros de ferrocarril.
3. Recolección directa en el campo.

Las dos primeras fuentes de origen son empleadas en Cuba, pero no así la tercera que si se utiliza a nivel internacional.

En la Tabla II.2 se muestran los valores de la composición química del recurso anteriormente mencionado y se observa que los RAC presentan un porcentaje de humedad bajo (15%) en comparación con el bagazo (50%).

Tabla II.2 Composición de la masa de trabajo de los RAC (%). Fuente: (Rodríguez et al., 2000)

Componentes						
C <sup>t</sup>	H <sup>t</sup>	O <sup>t</sup>	N <sup>t</sup>	S <sup>t</sup>	A <sup>t</sup>	W <sup>t</sup>
37,14	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15

### II.3.1.3 Relaciones de energía.

Las relaciones energéticas a utilizar en esta investigación se muestran en la Tabla II.3, las cuales estarán dadas por variantes porcentuales, las que, al desarrollarse el análisis gravimétrico para cada una, definirán el flujo de cada combustible de la combinación.

Tabla II.3 Variantes de relaciones de energía (%). Fuente: (Elaboración propia)

Variantes de relaciones de energía (%)		
Bagazo	Comb. Adic.	Variante
100	0	I
70	30	II
50	50	III

Como se muestra en la Tabla II.3, cada variante representa el porcentaje de cada combustible en la energía base de la combinación partiendo de la Variante I donde solo se quema bagazo hasta la Variante III donde se quema bagazo (50%) y RAC (50%). Finalmente estando definidas las combinaciones se obtienen las tres variantes porcentuales en flujos máxicos reales para cada combustible, así como la gravimetría de estos elementos.

Los flujos máxicos reales para cada variante energética a utilizar se determinan a partir de la Ec 2.1 y son mostrados en la Tabla II.4.

$$x = ((G * 10 * Q_{ib}^t) * V_c) / Q_i^t \tag{2.1}$$

Donde:

x: Flujo másico del combustible.

G: Carga Base del consumo de bagazo integral de la caldera para la generación nominal (G = 22 t/h). (Barroso, Barreras, Amaveda & Lozano, 2003)

v<sub>c</sub>: Valor porcentual del combustible a calcular para cada variante de la combinación.

Q<sub>i</sub>: Poder Calorífico Inferior del combustible a calcular.

Q<sub>ib</sub>: Poder Calorífico Inferior del combustible base (bagazo).

Tabla II.4 Relación entre las energías de entrada al horno de la caldera de bagazo con el combustible adicional. Fuente (Carrasco,2018)

Consumo de Combustibles (kg/h)		
Bagazo	RAC	Variante
22000	0	I
15400	3693	II
11000	6154	III

Las ecuaciones 2.2 y 2.3 presentan las expresiones de cálculo para realizar el análisis gravimétrico. Los resultados de cada combinación se pueden apreciar en la Tabla II.5.

$$g_1 = x_1 / (x_1 + x_2) \tag{2.2}$$

$$g_2 = (1 - g_1) \tag{2.3}$$

Donde:

g<sub>1</sub> y g<sub>2</sub>: Valores gravimétricos del combustible base y el adicional respectivamente.

x<sub>1</sub>: Flujo másico del combustible base para cada variante.

x<sub>2</sub>: Flujo másico del combustible adicional para cada variante.

Tabla II.5 Análisis gravimétrico de las combinaciones. Fuente (Carrasco,2018)

Análisis gravimétrico de la combinación Bagazo - RAC (kgx/kgcomb)		
Bagazo (g1) 50 % W	RAC (g2) 15 % W	Variante
g1	g2	
1,00	0,00	I
0,807	0,193	II
0,641	0,359	III

### II.3.2 Balance de energía en el proceso de combustión

Para la realización del balance de energía en el proceso de combustión se parte de definir las principales entradas al balance, las cuales tienen en cuenta fundamentalmente el tipo, composición y cantidad de biomasa, además de la tecnología a evaluar. Luego se identifica el método o procesamiento que se corresponde con el balance (energético) a aplicar, y por último se determinan las salidas, que en este caso se corresponden con el cálculo de la eficiencia energética y las pérdidas asociadas al proceso de combustión. Para una mayor información en el Anexo 2 se presenta un esquema del balance energético.

#### II.3.2.1 Cálculo de la eficiencia energética

La eficiencia térmica es el indicador más importante de trabajo de un generador de vapor, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo<sup>2</sup>. La Figura II.3 muestra el balance energético para un generador de vapor.

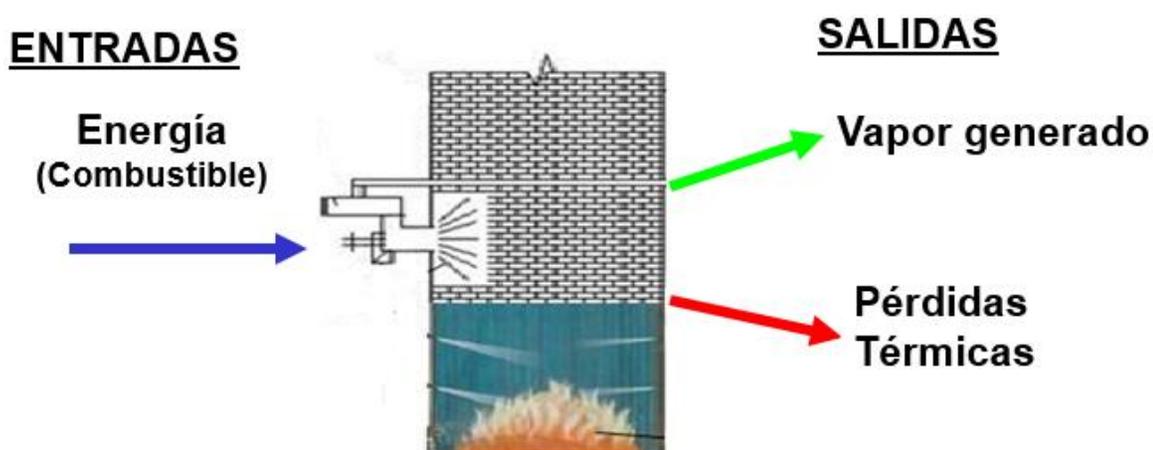


Figura II.3 Balance de energía en un generador de vapor. Fuente: (Elaboración propia)

Para el cálculo de la eficiencia energética según la literatura se utilizan dos métodos principalmente, el método directo o de entrada–salida y el indirecto, este último permite

---

<sup>2</sup> En las instalaciones modernas del total de la energía disponible en el combustible, se utiliza aproximadamente de 88% a 92%; el resto se convierte en pérdidas de calor, las cuales están asociadas a fenómenos como: incombustión química, incombustión mecánica, salida de los gases de la caldera, enfriamiento externo de las paredes de la misma y extracción de las escorias de los hornos.

el cálculo detallado de las pérdidas asociadas al proceso de combustión (Rodríguez et al., 2000). A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para determinar el rendimiento energético por ambos métodos.

*Método directo o de entrada-salida.*

Este método relaciona el calor transferido al agente de trabajo (calor absorbido) con la energía proveniente del combustible (calor disponible), tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_d = \frac{G_{evap} * (h_{gs} - h_{aa})}{Q_i^t * B_c} * 100 \text{ [\%]} \quad (2.4)$$

Donde:

$G_{evap}$ : Evaporación o capacidad de la caldera. [ $G_{evap} = 22\ 0000\ \text{kg/h}$ ]

$B_c$ : Consumo de combustible. [ $\text{kg/h}$ ]

$Q_i^t$ : Poder calórico inferior del combustible.

$h_{gs}$ : Entalpía de los gases a la salida.

$h_{aa}$ : Entalpía del agua alimentar.

Para el caso de los combustibles sólidos a utilizar el  $Q_i^t$  se determina por las ecuaciones 2.5 y 2.6 dependiendo del sistema de unidad que se requiera:

$$Q_i^t = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 24 * W^t \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.5)$$

$$Q_i^t = 80,9 * C^t + 246 * H^t - 26 * (O^t - S^t) - 5,7 * W^t \quad (\text{kcal/kg}) \quad (2.6)$$

En caso que se pretenda determinar el comportamiento del poder calórico inferior para cada relación de energía se puede aplicar la expresión 2.7. Los resultados de las tres variantes energéticas a analizar en esta investigación se muestran en la Tabla II.6.

$$X = g_1 * x_1 + g_2 * x_2 \quad (2.7)$$

Donde:

X – Valor resultante del parámetro a determinar de la combinación ( $Q_i^t$ ).

$x_1$  – Valor del combustible base (bagazo) en el cálculo del parámetro para la combinación deseada.

$x_2$  – Valor del combustible adicional (RAC) en el cálculo del parámetro para la combinación deseada.

Tabla II.6 Poder Calorífico Inferior de las combinaciones. Fuente: (Elaboración propia)

	Variante I	Variante II	Variante III
<b>Poder calórico inferior (kJ/kg)</b>	7 362,58	8 484,56	9 444,01

*Método indirecto o de las pérdidas*

El cálculo de la eficiencia energética por el método indirecto ( $\eta_I$ ) se obtiene partiendo de la ecuación 2.8:

$$\eta_I = (100 - \%P_T) [\%] \tag{2.8}$$

$$\%P_T = \frac{\sum q_i}{Q_i^t} = \frac{q_2+q_3+q_4+q_5+q_6}{Q_i^t} \tag{2.9}$$

Donde:

$\%P_T$ : Porcentaje de las pérdidas totales

$q_2$ : Pérdidas por los gases de escape.

$q_3$ : Pérdidas por incombustión química.

$q_4$ : Pérdidas por incombustión mecánica.

$q_5$ : Pérdidas por enfriamiento exterior.

$q_6$  Pérdidas por calor físico de la escoria.

El error entre el método directo y el indirecto depende, fundamentalmente, de la precisión que se logre en las mediciones y de la estabilidad del régimen de trabajo durante la realización de las mismas.

**II.3.3 Balance de exergía en el proceso de combustión**

El balance de exergía permite evaluar la cantidad y la calidad de la energía, donde se debe entender como calidad de la energía a la cantidad de ésta que puede ser convertida en trabajo con el fin de aumentar la eficiencia de un proceso y disminuir la exergía desechada al ambiente, ya que tiene la capacidad de generar cambios no deseados en

los ecosistemas (Contaminación térmica, por composición química, por vibraciones, etc.) (Dincer, 2007). Además, permite evaluar indicadores exergo-económicos como el costo exergético que no es más que la cantidad de exergía necesaria para la obtención de un producto, este indicador incluye la exergía del producto más la exergía necesaria para la obtención de ese producto. Es una herramienta de análisis que arroja información precisa sobre optimización y generalmente se emplea en procesos industriales. Para la conformación de dicho balance se precisa de conocer las principales entradas al método o procesamiento, con el fin de determinar la eficiencia exergética o disponibilidad para conocer cuánto vapor generado es aprovechado y su costo exergoeconómico. Las principales entradas para la realización del balance exergético están dadas por el tipo, composición, costo y cantidad de biomasa, además de la tecnología a evaluar (Ver Anexo 3).

Según Arrollo et al. (2016) para generadores de vapor, los cuales no generan trabajo, el cálculo de la eficiencia exergética o eficiencia de la segunda ley de la termodinámica hace referencia a lograr el objetivo del proceso en relación con los insumos necesarios para el desarrollo de dicho proceso, en términos de cambio de exergía o transferencias. El balance de exergía parte de la ecuación para un volumen de control:

$$e_2 - e_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (2.10)$$

Donde:

$e_2 - e_1$ : Aumento de exergía.

$(h_2 - h_1)$ : Diferencia de entalpía.

$(s_2 - s_1)$ : Diferencia de entropía.

$T_0$ : Temperatura ambiente.

Como las energías cinética y potencial son despreciables para estos equipos la ecuación puede expresarse como:

$$e_2 - e_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) \quad (2.11)$$

En la Figura II.4 se muestran las corrientes que intervienen en el generador de vapor para el proceso de combustión.



Figura II.4 Corrientes de entrada y salida en un generador de vapor. Fuente:(Elaboración propia)

A continuación, en la Tabla II.7 se presenta un resumen de las expresiones que permiten determinar el rendimiento exergético de un generador de vapor.

Tabla II.7 Expresiones para el cálculo de la eficiencia exergética. Fuente (Elaboración propia)

Ecuación	Número
$e_{aa} = (h_{aa} - h_o) - T_o(s_{aa} - s_o)$	2.12
$E_{aa} = m_{H_2O} * e_{aa}$	2.13
$E_{Combustión} = m_{Comb} * Q_d$	2.14
$E_{Combustible} = h_{comb} * m_{Comb}$	2.15
$T_{gs} = 172,32 + 24,76 * \alpha_H + \frac{43,22}{\sqrt{D_v}} - 0,213 * D_v$	2.16
$m_{ge} = V_{ge} * \rho_{ge} * m_{Comb}$	2.17
$E_{ge} = m_{ge} * C_p(T_{ge} - T_o)$	2.18
$e_{vs} = (h_{vs} - h_o) - T_o(s_{vs} - s_o)$	2.19
$E_{vs} = m_{vapor} * e_{vs}$	2.20
$E_v^{cal} = (E_{aa} + E_{combustión} + E_{Combustible}) - (E_{vs} + E_{ge})$	2.21
$\eta_{exerg}^{gv} = \frac{E_{sal}}{E_{ent}} = \frac{E_{vs} + E_{ge}}{E_{aa} + E_{combustión} + E_{Combustible}}$	2.22

Por otra parte, para realizar el cálculo del costo exergético primeramente se determina el factor de recuperación mediante la ecuación 2.23.

$$FR = \frac{ir(1+ir)^{Ny}}{(1+ir)^{Ny}-1} \tag{2.23}$$

Donde:

FR: Factor de recuperación.

Ir: Tasa de interés (%).

Ny: Tiempo de vida útil para el equipo (años).

Luego se determina el costo zonal utilizando la ecuación 2.24.

$$C_z = \frac{FR}{t_{op}} * C_{inv} \quad (2.24)$$

Donde:

C<sub>z</sub>: Costo zonal (CUC/h).

t<sub>op</sub>: Tiempo de operación anual (h/año).

C<sub>inv</sub>: Costo de la inversión (CUC).

Posteriormente se determina el costo exergetico del combustible y del agua mediante las ecuaciones 2.25 y 2.26 respectivamente.

$$CE_{comb} = \frac{P_{comb}}{Q_d} \quad (2.25)$$

Donde:

CE<sub>comb</sub>: Costo exergetico del combustible (CUC/kJ).

P<sub>comb</sub>: Precio del combustible (CUC/kg).

$$CE_{agua} = \frac{P_{agua}}{e_{aa}} \quad (2.26)$$

Donde:

CE<sub>agua</sub>: Costo exergetico del agua (CUC/kJ).

P<sub>agua</sub>: Precio del agua (CUC/m<sup>3</sup>).

e<sub>aa</sub>: Exergía específica del agua de alimentar; (kJ/kg).

Utilizando la ecuación 2.27 se determina el costo exergetico del vapor.

$$CE_{vs} = \frac{CE_{comb} + CE_{agua}}{\eta_{exerg}} + \frac{C_z}{E_{vs}} \quad (2.27)$$

Donde:

$CE_{vs}$ : Costo exergoeconómico del vapor (CUC/kJ).

$E_{vs}$ : Exergía del vapor producido por la caldera (kW)

Por último, el costo de producción de vapor saturado se determina mediante la ecuación 2.28.

$$Cp_{vs} = \frac{CE_{vs} * E_{vs}}{D_v} \quad (2.28)$$

Donde:

$Cp_{vs}$ : Costo de producción del vapor saturado (CUC/ton).

### II.3.4 Balance de emergía en el proceso de combustión

El balance emergético permite visualizar y cuantificar de forma dinámica los flujos de los recursos naturales, de los servicios ambientales provenientes de la naturaleza y de los impactos de las actividades, permitiendo la comprensión de los límites en cada ecosistema o sistema productivo y el establecimiento de metas para garantizar la capacidad de soporte, es decir, determina la sustentabilidad de los sistemas (Aguilar-Rivera, 2015). Este procedimiento está diseñado para evaluar los flujos de energía y materiales de los sistemas en unidades comunes (seJ) que permitan al analista comparar aspectos ambientales y financieros de los sistemas (Odum, 1996).

Para la realización del balance de emergía en el proceso de combustión se parte del siguiente esquema (Figura II.5), donde se puede apreciar que los recursos renovables, no renovables, materiales de la economía y servicios de la economía constituyen las diferentes entradas al método o procesamiento, y que entre los principales indicadores emergéticos que permite obtener este balance se encuentra la razón de renovabilidad y el índice de sostenibilidad, entre otros.

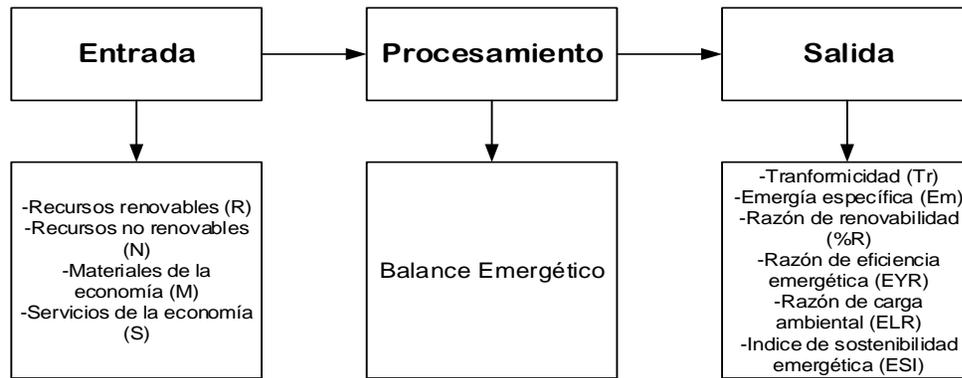


Figura II.5 Esquema del balance energético en el proceso de combustión. Fuente: (Puig, 2018).

### II.3.4.1 Diagrama de flujos

Los diagramas de flujos se usan para mostrar de modo explícito los flujos entrantes en un sistema que se suman para obtener la energía de un producto determinado. El propósito de un diagrama de flujos es desarrollar un inventario crítico de los procesos, reservas y flujos que son “impulsores” importantes del sistema (todos los flujos que entran dentro de los límites del sistema) y son por tanto necesarios para la evaluación. La Figura II.6 muestra el diagrama energético del bloque de generación para el caso de estudio, donde se aprecia la influencia de los flujos de entrada en el sistema y su salida en forma de vapor, además de la degradación de energía que ocurre en todo el proceso.

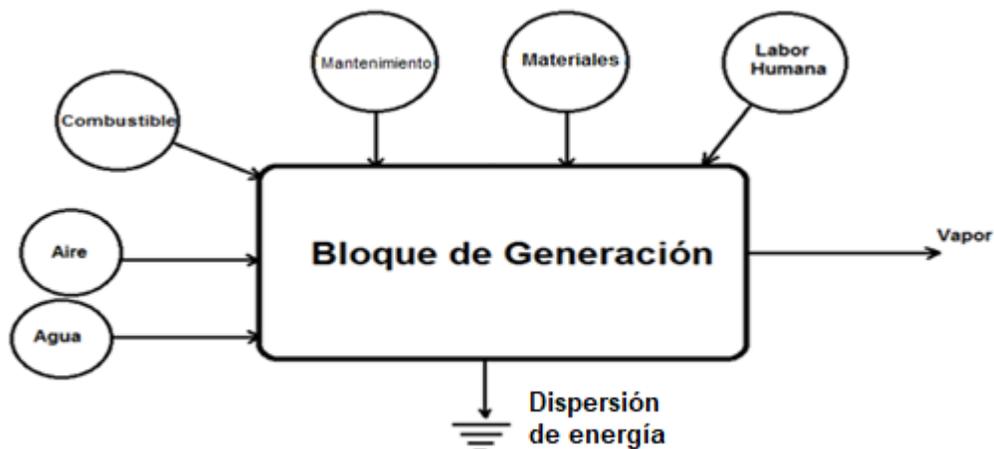


Figura II.6 Diagrama energético del bloque de generación. Fuente (Puig,2018)

### II.3.4.2 Construcción de tablas emergéticas

Partiendo del diagrama de flujos se procede a la construcción de la tabla emergética. Como se muestra en la Tabla II.8 esta presenta el orden de cada uno de los flujos y su origen en la primera columna. Luego la segunda columna muestra el nombre de dichos flujos, la tercera el valor proporcionado por los cálculos de cada flujo, y en la cuarta columna figuran sus unidades correspondientes. La quinta columna se refiere a la emergía por unidad (transformicidad o emergía específica), que convierte los valores de la tercera columna a los valores de la sexta columna, llevando todos los valores a una misma unidad de medida, la emergía solar.

Tabla II.8 Ejemplo típico de una tabla emergética. Fuente: (Lomas, 2009)

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
1	Item1	xx.x	J/año	xxx.x	Em <sub>1</sub>
2	Item2	xx.x	g/año	xxx.x	Em <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
n.	Ene-ésimo Item	xx.x	J/año	xxx.x	Em <sub>n</sub>
Y	Y-ésimo Producto	xx.x	J ó g/año	$\frac{\sum_n Em_i}{xx.x}$	$\sum_n Em_i$

Las ecuaciones 2.29-2.35 permiten calcular los totales de los recursos renovables (R), no renovables (N) y estos comprenden los recursos de la naturaleza (I), además de los materiales de la economía (M), los servicios de la economía (S), que a su vez comprenden los adquiridos de la economía (F).

$$R = \sum_{i=1}^n \text{Recursos renovables} \tag{2.29}$$

$$N = \sum_{i=1}^n \text{Recursos no renovables} \tag{2.30}$$

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Materiales de la economía} \tag{2.31}$$

$$S = \sum_{i=1}^n \text{Servicios de la economía} \tag{2.32}$$

$$I = R + N \tag{2.33}$$

$$F = M + S \tag{2.34}$$

$$Y = I + F \tag{2.35}$$

Para el cálculo de los flujos que intervienen en el balance energético se procede a la realización de una tabla resumen (Tabla II.9) que contiene las principales expresiones.

Tabla II.9 Expresiones para el cálculo de los flujos energéticos. Fuente (Elaboración propia)

Ecuación	Número
$F_{aire\ N} = \frac{0,231 * \text{Bagazo quemado}}{\alpha_H * \text{Bagazo quemado}}$	2.36
$V_{aire} \left( \frac{kg}{año} \right) = V_a^o * \alpha_H * Bc * \rho_{aire} * 2800 \frac{h}{año}$	2.37
$V_a \left( \frac{J}{año} \right) = \left[ V_a \left( \frac{kg}{año} \right) * C_p * T_o \right] * \frac{1000J}{kg}$	2.38
$V_{aR} \left( \frac{J}{año} \right) = 0,799 * V_a \left( \frac{J}{año} \right)$	2.39
$V_{aN} \left( \frac{J}{año} \right) = 0,201 * V_a \left( \frac{J}{año} \right)$	2.40
$m_{H2O} \left( \frac{kg}{año} \right) = m_{H2O} \left( \frac{kg}{h} \right) * 2800 \frac{h}{año}$	2.41
$Labor \left( \frac{J}{año} \right) = \left( \frac{\text{obreros h}}{año} / \frac{8 \text{ obreros h}}{año} \right) * 2500 \frac{kcal}{día} * 4186 * \frac{J}{kcal}$	2.42
$m_{c\ H2O} \left( \frac{CUC}{año} \right) = m_{H2O} \left( \frac{kg}{h} \right) * 2800 \frac{h}{año} * P_{agua} \left( \frac{CUC}{m^3} \right) * \frac{1g}{1000kg}$	2.43
$m_{c\ comb} \left( \frac{CUC}{año} \right) = m_{comb} \left( \frac{kg}{h} \right) * 2800 \frac{h}{año} * P_{comb} \left( \frac{CUC}{kg} \right) * \frac{1g}{1000kg}$	2.44

### II.3.4.3 Cálculo de indicadores energéticos

Como se pudo apreciar anteriormente el análisis energético clasifica las entradas del sistema en recursos renovables (R), no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (S). Esto permite el cálculo de una serie de índices o indicadores que nos brindan información sobre diversas características del sistema, permiten establecer comparaciones entre varios escenarios para el manejo del mismo, así como la comparación entre diversos sistemas. A continuación, se muestran estos indicadores detalladamente.

La *transformicidad* (Tr) expresa la cantidad de recursos necesarios para la obtención de un producto específico (Sánchez, Gutiérrez & Osorio, 2006). Es la relación entre la energía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (Ep), su unidad es el seJ. Cuanto mayor Tr más energía se requiere para generar productos. La ecuación 2.45 muestra cómo se determina dicho parámetro.

$$Tr = \frac{Y}{E_p} \tag{2.45}$$

La *energía específica* ( $E_m$ ) se define como la energía total ( $Y$ ) por unidad de masa de los productos de salida ( $P$ ), por lo que su unidad es usualmente seJ/g. Los elementos y compuestos poco abundantes en la naturaleza por consiguiente tienen una energía específica mayor cuando se encuentran concentrados dado que más trabajo fue requerido para concentrarlos, espacial y químicamente (Brown, 2004). Esta energía específica puede ser obtenida a partir de la ecuación 2.46.

$$E_m = \frac{Y}{P} \quad (2.46)$$

La *razón de renovabilidad* (%R) evalúa la sustentabilidad del sistema de producción, está definida como la relación entre el contenido de energía de los recursos renovables ( $R$ ) y el total de energía usada para obtener el producto ( $Y$ ). De aquí se deduce que los sistemas naturales tendrán valores altos de renovabilidad, mientras que valores bajos de renovabilidad indican mayor uso de recursos no renovables para la obtención del producto (Sánchez et al., 2006). Por tanto, se puede llegar a la conclusión que solo los procesos con un alto rendimiento (%R) son ecológicamente sostenibles. La ecuación 2.47 expresa como se determina dicho indicador.

$$\%R = \frac{R}{Y} * 100 \quad (2.47)$$

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 mínimo de EYR es 1, e indica que un proceso entrega la misma cantidad de energía 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 superiores 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, 2004). La ecuación 2.48 muestra la manera de calcular este indicador.

$$EYR = \frac{R+N+F}{F} \quad (2.48)$$

La *razón de carga ambiental* (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). Mientras mayor sea el valor de este índice, mayor será el impacto ambiental del sistema, es decir, este indicador es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos (Cano, 2012). La ecuación 2.49 permite el cálculo de dicho indicador.

$$ELR = \frac{N+F}{R} \quad (2.49)$$

Brown (2004) expresa que si el ELR y el EYR se combinan se crea un *índice de sostenibilidad* (ESI) que representa una medida de la potencial contribución del sistema (EYR) por unidad de carga impuesta al sistema local (ELR). Este indicador se determina usando la ecuación 2.50.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (2.50)$$

#### **II.4 Análisis multicriterio. Proceso de jerarquía analítica (AHP)**

La cuarta etapa de este estudio radica en aplicar un análisis de decisión multicriterio (MCDA) que permita la posibilidad de comparar sobre la misma base los procedimientos investigados en la metodología de costes físicos o energéticos, ya que entre las principales deficiencias de dicha metodología resalta la imposibilidad de comparar dentro de un mismo marco las alternativas analizadas, por no brindar información suficiente para decidir cuál de estas alternativas es la más favorable. En la Figura II.7 se presenta el enfoque propuesto para la evaluación de las alternativas de combustión de biomasa cañera existentes en la provincia utilizando un proceso de jerarquía analítica.

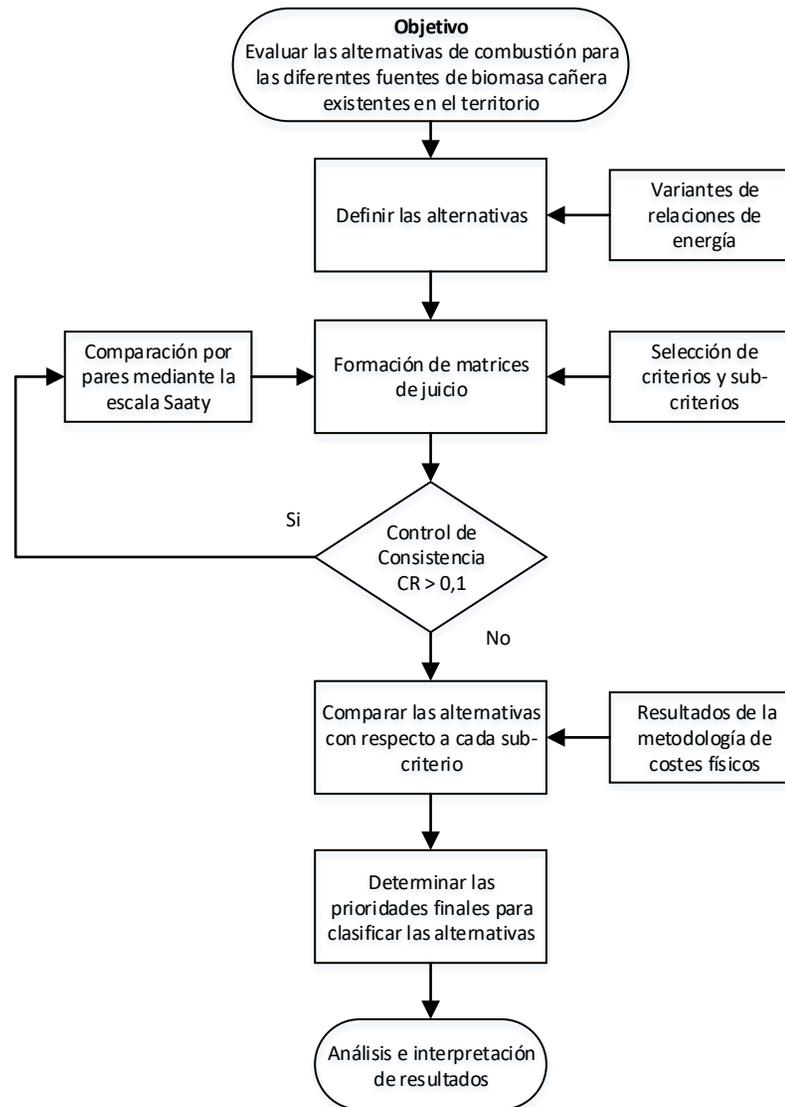


Figura II.7 Enfoque propuesto para la evaluación de los diferentes tipos de combustión de biomasa cañera existentes en la provincia. Fuente: (Elaboración propia)

La comunidad científica internacional declaró la metodología AHP como una herramienta robusta y flexible de toma de decisiones multicriterio para tratar problemas complejos de decisión (Daniel, Vishal & Albert, 2008). La técnica AHP rompe el complicado problema de decisión de una manera lógica, en pequeños pero relacionados sub-problemas, en una estructura jerárquica de varios niveles. Este método permite a los responsables de la toma de decisiones (DMs en inglés) realizar comparaciones por pares para obtener una importancia relativa de la variable en cada nivel de la jerarquía y/o evalúa las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquía para poder tomar la mejor decisión entre

todas las alternativas (Qazi et al., 2018). El AHP puede involucrar discusiones grupales y modificaciones para finalmente lograr un acuerdo. Además, este método elimina juicios inconsistentes realizando una verificación de consistencia. La técnica AHP es el método más popular de MCDA y ha sido ampliamente adoptado para la evaluación y selección de tecnologías en el sector de las energías renovables. Los próximos pasos son desarrollados por Saaty para la aplicación del AHP (Triantaphyllou & Mann, 1995; Daniel et al., 2008; Görener, 2012; Kambiz, Amin & Shabnam, 2012; Babalola, 2015; Sindhu, Nehru & Luthra, 2016; Qazi et al., 2018) y se han seguido en esta investigación.

#### *Definir objetivo*

Definir el objetivo del problema, es decir, seleccionar la mejor alternativa de conversión de biomasa en energía a partir de balances energéticos, exergéticos y emergéticos.

#### *Construir estructura de jerarquía*

Estructurar el problema bajo la consideración de una jerarquía, que desglosa el objetivo, los criterios, los sub-criterios y las alternativas del problema en varios niveles.

#### *Hacer comparaciones por pares para generar matrices*

Después de la formación de la jerarquía, se lleva a cabo la comparación por pares entre los criterios con respecto al objetivo, entre los sub-criterios con respecto al criterio relativo y entre las alternativas con respecto a todos los sub-criterios, lo que conduce a la formación de matrices de juicio. Los juicios se basan en una comparación estandarizada de la escala de nueve niveles Saaty, que figura en la Tabla II.10 (Saaty & Vargas, 2012). Además, para determinar las prioridades de las alternativas es necesario resolver las matrices de juicio utilizando la metodología AHP. El vector de prioridad local (PVE o  $w$ ) para los juicios matriciales se obtiene normalizando los vectores en cada columna de la matriz, y luego calculando el promedio de las filas de la matriz resultante. Sin embargo, las prioridades globales para cada alternativa se determinan sintetizando las prioridades locales sobre la jerarquía.

Tabla II.10 Escala de nueve puntos Saaty para la comparación por pares. Fuente:  
(Saaty & Vargas, 2012)

Valoración numérica	Juicios verbales de preferencias entre alternativas <i>i</i> y alternativas <i>j</i>
1	<i>i</i> es igualmente importante a <i>j</i>
3	<i>i</i> es ligeramente más importante que <i>j</i>
5	<i>i</i> es fuertemente más importante que <i>j</i>
7	<i>i</i> es rotundamente más importante que <i>j</i>
9	<i>i</i> es extremadamente más importante que <i>j</i>
2,4,6,8	Valores intermedios

### Control de consistencia

Esto garantiza que los juicios de comparación por pares sean lo suficientemente consistentes al calcular la relación de consistencia (*CR*). Primero, se debe calcular el principio de valor propio ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) para cada matriz usando la ecuación 2.51:

$$A * w = \lambda_{m\acute{a}x} * w \tag{2.51}$$

donde *A* es la matriz de comparación,  $\lambda_{m\acute{a}x}$  es el principio del valor propio y *w* es el vector propio correctamente normalizado (vector de prioridad).

Segundo, se estima el índice de consistencia (*CI*) para cada matriz con la dimensión "*n*" utilizando la ecuación 2.52:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \tag{2.52}$$

Entonces finalmente se calcula el *CR* usando la ecuación 2.53:

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{2.53}$$

donde *RI* es el índice aleatorio. El valor de *RI* se selecciona según la dimensión de la matriz de comparación (*n*). La Tabla II.11 ilustra los diferentes valores de *RI* para matrices que tienen un orden *n* de 1 a 10. El límite aceptable de los valores de *CR* depende del tamaño de la matriz, por ejemplo, el valor de *CR* aceptable para la matriz de 3x3 es 0,05, la matriz de 4x4 es 0,08 y para matrices que tienen un tamaño  $\geq 5 \times 5$  es 0,1 (Sindhu et al, 2016).

Tabla II.11 Valores de índice aleatorio (*RI*) para diferentes tamaños de matrices. Fuente: (Qazi et al., 2018)

Tamaño de la matriz ( <i>n</i> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

### Conclusiones parciales

1. La formulación de una metodología de costes físicos basada en balances energéticos, exergéticos y emergéticos permitió determinar indicadores de eficiencia energética y calidad de la energía, así como costos exergoeconómicos de la producción de vapor. Además de incorporar indicadores de sustentabilidad a partir de criterios emergéticos.
2. Varias son las metodologías que permiten una evaluación integral de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa. Pero las disposiciones que tiene el método AHP, de convertir un problema complejo, en una jerarquía simple, viable e intuitivamente atractiva, su capacidad para combinar criterios cualitativos y cuantitativos en el mismo marco de decisión y el uso de ayudas computacionales que conducen a decisiones exitosas en la mayoría de sus dominios, constituyeron las bases de su selección para evaluar el potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera con fines energéticos desde una perspectiva multicriterio.



# Capítulo III

## CAPÍTULO III: SOTENIBILIDAD DE LA BIOMASA CAÑERA A PARTIR DEL MÉTODO AHP

### III.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se desarrolla la metodología general propuesta en el Capítulo II, mediante la cual primeramente se muestra el estado actual de los combustibles que serán evaluados (bagazo y residuos agrícolas cañeros) en una caldera del tipo RETAL. Luego, se presentan los principales resultados alcanzados en los análisis de costes físicos o energéticos, para su posterior comparación desde un punto de vista multicriterio, utilizando el proceso de jerarquía analítica.

### III.2 Levantamiento de las biomásas cañeras que existen en el territorio

La caña de azúcar tiene el mayor potencial de conversión solar de todos los cultivos, hasta un 6,7% (García, 2017). Los subproductos y desechos de la industria azucarera y los residuos agrícolas de la caña de azúcar son las principales fuentes de biomasa en la provincia de Cienfuegos. Es posible utilizar los residuos mencionados para la producción de energía y favorecer la sostenibilidad de la industria azucarera (Arteaga, Cabrera, Rodríguez & Casas, 2014), por lo tanto las biomásas que se utilizarán en este estudio son el bagazo y los RAC, los totales de los últimos años se muestran en las Tablas III.1 y III.2 provocado por el desarrollo que presenta la industria en nuestra provincia. Además, en los Anexos 5 y 6 se muestran cómo se procesan estas biomásas.

Tabla III.1 Bagazo producido y utilizado como combustible en toneladas en las tres últimas zafras.

Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

Zafras	Bagazo producido (t)	Bagazo combustible (t)	Bagazo sobrante (t)
2015-2016	529 682	503 197	26 485
2016-2017	541 361	515 904	25 457
2017-2018	350 224	331 450	18 774
<b>Total</b>	<b>1 421 267</b>	<b>1 350 551</b>	<b>70 716</b>

La tabla anterior muestra que en las tres últimas zafas en la provincia de Cienfuegos se contó con un total de 1 421 267 toneladas de bagazo, de ello solo se utilizaron 1 350 551 toneladas como combustible y 70 716 toneladas fueron reportadas como bagazo sobrante, teniendo como promedio 473 755 toneladas de bagazo producido por año. El bagazo sobrante puede ser aprovechado de diferentes formas, una de ellas puede ser el aprovechamiento calórico a través de la combustión controlada, ya que este posee ciertas características que hacen que pueda utilizarse directamente.

Tabla III.2 Paja en los Centros de Limpieza en las tres últimas cosechas. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

<b>Cosechas</b>	<b>Pajas en centros de limpieza (t)</b>
2015-2016	99 564
2016-2017	83 070
2017-2018	51 607
<b>Total</b>	<b>234 241</b>

Por otra parte, en la tabla anterior se puede apreciar que el total de paja en los centros de limpieza para la provincia de Cienfuegos en las tres últimas cosechas ascendió hasta las 234 241 toneladas, mostrando una tendencia al decrecimiento con el devenir de los años.

### III.3 Descripción de la tecnología

En vistas de lo planteado anteriormente y a que Cienfuegos es una de las provincias con mayor desarrollo en el sector azucarero, ya que cuenta con cinco centrales, la tecnología de aprovechamiento energético para evaluar las biomásas seleccionadas la constituyen los generadores de vapor tipo RETAL, que son los de mayor presencia en los centrales de nuestro país para la combustión de bagazo. En el Anexo 7 se muestra el esquema de una caldera del tipo RETAL y las zonas que la componen.

### III.4 Resultados de la metodología de costes físicos o energéticos

Para poder comparar desde una perspectiva multicriterio las alternativas de combustión de biomasa cañera existentes en el territorio se procede inicialmente al cálculo de los tres balances de costes energéticos (energético, exergético y emergético). Los resultados del cálculo de estos balances permitirán realizar un análisis termo-económico del sistema, además de valorar el potencial de los recursos naturales y la sostenibilidad del proceso de combustión.

#### III.4.1 Análisis energético

Debido a que con anterioridad en nuestro país se ha estimado la eficiencia energética (por uno o ambos métodos) de una caldera RETAL para las tres variantes de energía propuestas en esta investigación, a continuación, en la Tabla III.3 se presenta un resumen de los principales resultados, así como la bibliografía consultada para la obtención de los mismos.

Tabla III.3 Valores de eficiencia energética por ambos métodos en % y bibliografía consultada. Fuente:  
(Elaboración propia)

Variante	Eficiencia energética (Método Indirecto)	Eficiencia energética (Método Directo)	Bibliografía consultada
I	77,67	78,50	(Puig, 2018)
II	78,90	79,83	(Carrasco, 2018)
III	79,72	80,72	(Puig, 2018)

El balance energético presentó que la eficiencia calculada por el método directo es mayor que la calculada por el método indirecto, debido a que este último toma en consideración un número de pérdidas ( $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ , etc.) que no toma en cuenta el método directo. Los valores más bajos de eficiencia los representa la combustión de bagazo (Variante I) con un 77,67% por el método de las pérdidas y con un 78,5% por el método de entrada-salida, y los valores más altos lo representa la Variante III con un 79,72% y 80,72% respectivamente.

### III.4.2 Análisis exergético

El análisis exergético se realizará solamente para la variante correspondiente a la quema de 70% de bagazo y 30% de RAC, ya que con anterioridad se han realizado estudios que incorporan las demás variantes energéticas involucradas en esta investigación.

#### III.4.2.1 Determinación de la eficiencia exergética

Para proceder al cálculo de la eficiencia exergética de la variante a analizar se precisa de conocer los principales parámetros de operación de la tecnología a evaluar y las corrientes que intervienen en el generador de vapor para el proceso de combustión (Figura II.4). La Tabla III.4 muestra los parámetros de trabajo para este tipo de generador de vapor.

Tabla III.4 Parámetros de trabajo de una caldera RETAL. Fuente: (Barroso et al., 2003)

Parámetros	Valor
Presión	1,9 MPa
Temperatura	320 °C
Producción de vapor	45 t/h
Consumo de combustible para el Bagazo	22 t/h
Temperatura agua a alimentar	80 °C
Presión de la bomba de agua alimentar	3 MPa

Luego con la ayuda del software Chemical Logic Steam Tab Companion (CLSTC) se determinan los diferentes valores de entalpías, entropías y las condiciones de los gases de escape, partiendo de los parámetros de la tecnología de aprovechamiento y la composición de las biomásas. En las Tablas III.5, III.6 y III.7 se ofrecen los valores de entalpía, entropía y las condiciones de los gases de escape respectivamente. Destacar que las condiciones del estado de referencia se evalúan a una temperatura de 27 °C, mientras que las condiciones de los gases de escape se evalúan a la temperatura calculada a partir de la ecuación 2.16.

Tabla III.5 Entalpías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Entalpías (kJ/kg)</b>	
<b>Entalpía del agua alimentar (<math>h_{aa}</math>)</b>	337,36
<b>Entalpía a las condiciones de referencia (<math>h_o</math>)</b>	113,28
<b>Entalpía del vapor saturado (<math>h_{vs}</math>)</b>	2 700,59
<b>Entalpía del combustible para la variante II (<math>h_{comb}</math>)</b>	8 484,56

Tabla III.6 Entropías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Entropías (kJ/kgK)</b>	
<b>Entropía del agua de alimentar (<math>s_{aa}</math>)</b>	1,07
<b>Entropía a las condiciones de referencia (<math>s_o</math>)</b>	0,39
<b>Entropía del vapor saturado (<math>s_{vs}</math>)</b>	5,54

Tabla III.7 Condiciones de los gases de escape. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Temperatura de los gases de escape (K)</b>	483,75
<b>Densidad de los gases de escape (kg/m<sup>3</sup>)</b>	9,42
<b>Volumen específico de los gases de escape (m<sup>3</sup>/ kg)</b>	0,11
<b>Calor específico de los gases de escape (kJ/kgK)</b>	3,01

Aplicando las ecuaciones 2.12 y 2.19 se determinan las exergías específicas del agua alimentar y del vapor saturado respectivamente (Tabla III.8).

Tabla III.8 Exergías específicas en kJ/kg. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Agua de alimentar (<math>e_{aa}</math>)</b>	20,50
<b>Vapor saturado (<math>e_{vs}</math>)</b>	1 044,71

Para calcular la exergía del agua alimentar, de la combustión, de los combustibles, de los gases de escape y del vapor producido se utilizan las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15, 2.18 y 2.20 respectivamente. En la Tabla III.9 se muestran los resultados de las exergías calculadas.

Tabla III.9 Exergía de entrada y salida del sistema. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Exergía (kJ/h)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	922 590
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	12 176 010
<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	47 011 905
<b>Exergía del combustible para la variante II (<math>E_{combustible}</math>)</b>	111 455 602,7
<b>Exergía de la combustión para la variante II (<math>E_{combustión}</math>)</b>	111 455 602,7

Una vez obtenidas las exergías de los flujos de entrada y salida se procede al cálculo de las pérdidas exergéticas y a la determinación de la eficiencia exergética mediante la ecuación 2.21 y 2.22 respectivamente. La Tabla III.10 presenta los resultados de ambas ecuaciones.

Tabla III.10 Valores de pérdidas y de eficiencia exergética. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Parámetro</b>	<b>Variante II</b>
<b>Pérdida de exergía en el generador de vapor (kJ/h)</b>	53 190 277,74
<b>Eficiencia exergética del generador de vapor (%)</b>	26,44

### III.4.2.2 Cálculo de los costos exergoeconómicos

Los valores preliminares que permiten el cálculo exergoeconómico se exponen en la Tabla III.11 y fueron tomados de Lobelles (2015), quien realizó un estudio a un generador de vapor de similares características.

Tabla III.11 Datos preliminares para el cálculo exergoeconómico. Fuente: (Lobelles, 2015)

<b>Tasa de interés (Adimensional)</b>	0,1
<b>Tiempo de vida útil (año)</b>	25
<b>Tiempo de operación anual (h/año)</b>	2 800
<b>Costo de la inversión (CUC)</b>	115 000
<b>Precio del agua (CUC/m<sup>3</sup>)</b>	0,33
<b>Precio del Bagazo (CUC/ton)</b>	1,50
<b>Precio del RAC (CUC/ton)</b>	7,53

A continuación, en la Tabla III.12 se reflejan los resultados obtenidos de la determinación de los diferentes costos exergoeconómicos. Las ecuaciones 2.25, 2.26, 2.27, y 2.28

fueron utilizadas para determinar el costo exergético del combustible, del agua, del vapor y de la producción de vapor respectivamente.

Tabla III.12 Costos exergoeconómicos de la producción de vapor. Fuente: (Elaboración propia)

<b>Costo exergético del Bagazo (CUC/kJ)</b>	2,0373E-07
<b>Costo exergético del RAC (CUC/kJ)</b>	8,8749E-07
<b>Costo exergético del agua (CUC/kJ)</b>	1,6096E-05
<b>Costo exergoeconómico del vapor (Variante II) (CUC/kJ)</b>	7,4620E-05
<b>Costo de producción del vapor (Variante II) (CUC/ton)</b>	85,76

Para el caso de las dos variantes restantes Puig (2018) destaca que la disponibilidad más alta (33,65%) es para el caso de la quema de 50% de bagazo y 50% de RAC, mientras que para el caso del bagazo la eficiencia exergética o disponibilidad fue de solo un 18,22%. Este último presenta el mayor costo de producción de vapor (93,57 CUC/ton), en comparación a la combinación de la variante III, la cual alcanzó los 80,26 CUC/ton de costo de producción de vapor.

### III.4.3 Análisis emergético

En esta sección se presentan todos los cálculos necesarios para la realización del balance emergético. Destacar que el análisis emergético por las mismas razones que el análisis exergético se realizará solamente para la variante II, y en cuanto al tiempo de evaluación se toma un período de un año.

Como se pudo apreciar en el Capítulo anterior las principales corrientes de entradas al sistema se clasifican en recursos renovables (R), recursos no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (S). En la Tabla III.13 se muestran los flujos de estas corrientes y su clasificación. Para determinar el flujo de aire en J/año (Ec 2.38) se parte de conocer el flujo de aire en kg/año que interviene en la combustión (Ec 2.37). Luego mediante las ecuaciones 2.39 y 2.40 se determina la parte renovable y la no renovable. Posteriormente utilizando las ecuaciones 2.41, 2.42, 2.43 y 2.44 se determinan los flujos de agua, labor humana<sup>3</sup>, costo del agua y costo de recogida y

<sup>3</sup> Para el caso de este estudio en particular se asume un total de cuatro obreros que trabajan ocho horas diarias.

transportación (RT) de los combustibles respectivamente. Destacar que el costo de mantenimiento anual para la tecnología seleccionada se estimó de 280 CUC.

Tabla III.13 Clasificación de las principales entradas del sistema para la variante II. Fuente: (Elaboración propia)

Nombre	Flujo	Unidades/año	Clasificación
Aire	8,3856E+13	J	R
Bagazo	4,3120E+07	kg	R
RAC	1,0334E+07	kg	R
Aire	1,0950E+13	J	N
Agua	1,2600E+08	kg	N
Costo de RT del bagazo	6,4680E+07	CUC	M
Costo de RT del RAC	7,7816E+07	CUC	M
Costo del agua	4,1580E+04	CUC	M
Mantenimiento	2,8000E+02	CUC	S
Labor Humana	1,2056E+10	J	S

#### III.4.3.1 Resultados de la tabla emergética

Partiendo de los datos mostrados anteriormente (Tabla III.13) y utilizando las diferentes transformidades (Tabla III.14) se procede a la construcción de la tabla emergética para la variante II (Tabla III.15).

Tabla III.14 Transformidad y la bibliografía de la que fue tomada. Fuente: (Elaboración propia)

Transformidades	Valor	Bibliografía
<b>Aire</b>	9,8200E+02	(Valdés, 2017)
<b>Agua</b>	5,4264E+05	(Valdés, 2017)
<b>Bagazo</b>	9,5501E+09	(Valdés, 2017)
<b>RAC</b>	3,2667E+09	(Puig, 2018)
<b>Mantenimiento</b>	4,6000E+12	(Valdés, 2017)
<b>Labor humana</b>	3,9300E+06	(Valdés, 2017)

Tabla III.15 Tabla emergética para la variante II. Fuente: (Elaboración propia)

Nota	Ítem	Flujo	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
<b>Recursos renovables de la naturaleza (R)</b>					<b>4,4564E+20</b>
1	Aire	8,3856E+13	J/año	9,8200E+02	8,2347E+16
2	Bagazo	4,3120E+10	g/año	9,5501E+09	4,1180E+20
3	RAC	1,0334E+10	g/año	3,2667E+09	3,3758E+19
<b>Recursos no renovables de la naturaleza (N)</b>					<b>7,9126E+16</b>
4	Aire	1,0950E+13	J/año	9,8200E+02	1,0753E+16
5	Agua	1,2600E+11	g/año	5,4264E+05	6,8373E+16
<b>Materiales de la economía (M)</b>					<b>6,5567E+20</b>
6	Costo de RT del bagazo	6,4680E+07	CUC/año	4,6000E+12	2,9753E+20
7	Costo de RT del RAC	7,7816E+07	CUC/año	4,6000E+12	3,5795E+20
8	Agua	4,1580E+04	CUC/año	4,6000E+12	1,9127E+17
<b>Servicios de la economía (S)</b>					<b>4,8667E+16</b>
9	Mantenimiento	2,8000E+02	CUC/año	4,6000E+12	1,2880E+15
10	Labor Humana	1,2056E+10	J/año	3,9300E+06	4,7379E+16
<b>Emergía total (Y)</b>					<b>1,1014E+21</b>

En la tabla anterior se puede apreciar que el mayor flujo emergético proviene de los materiales de la economía (6,5567E+20 seJ/año) representando el 59,53% de la emergía total, mientras que la menor emergía es la aportada por los servicios de la economía (4,8667E+16 seJ/año) y representa solo el 0,0044%.

#### III.4.3.2 Análisis de indicadores emergéticos

El análisis de los indicadores parte de conocer la emergía específica del vapor producido por la caldera, la cual se determina a partir de la ecuación 2.46 y su resultado se muestra en la Tabla III.16.

Tabla III.16 Emergía específica del vapor producido. Fuente: (Elaboración propia)

Producto	Producción (g/año)	Emergía específica
Vapor (Variante II)	1,2600E+11	8,7416E+09

En la Tabla III.17 se presentan los valores de los demás indicadores emergéticos, determinados a partir de las ecuaciones 2.47-2.50.

Tabla III.17 Indicadores emergéticos para la variante II. Fuente: (Elaboración propia).

Indicadores	Bagazo-RAC
Razón de renovabilidad (%R)	40,46
Razón de eficiencia emergética (EYR)	1,680
Razón de carga ambiental (ELR)	1,472
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	1,141

En la tabla anterior se puede constatar que la razón de renovabilidad (40,46%) y la razón de eficiencia emergética (1,680) manifiesta que el sistema no explota en gran medida los recursos naturales, mientras que el valor de la razón de carga ambiental del proceso indica que este presenta un bajo impacto ambiental ( $1,472 < 2$ ). En el caso del  $ESI = 1,141$  demuestra que a largo plazo el sistema no es sustentable.<sup>4</sup>

Para las demás variantes analizadas en esta investigación Puig (2018) señala que la razón de renovabilidad para la variante I (58,04%) demuestra que se explota moderadamente los recursos naturales, en cambio para la variante III dicho parámetro solo alcanzó el 30,22% manifestando que el sistema explota en mucha menor cantidad los recursos naturales. Por otra parte, el índice de sostenibilidad emergética para ambas alternativas de combustión (3,30 y 0,62 respectivamente) refleja que a largo plazo dichos sistemas no son sustentables (ambos son menores que 5), aunque el valor obtenido para el primer caso da una medida de que el sistema contribuye moderadamente a la economía.

### III.5 Desarrollo del modelo AHP

Para aplicar la técnica AHP, se hace necesario establecer un sistema de asesoramiento de expertos para identificar/modificar las opciones de conversión de biomasa en energía (BTE en inglés) y los factores que afectan su selección. Dicho proceso de consulta debe incluir diferentes sectores, incluyendo departamentos de decisión, industrias e institutos de investigación, además de formarse sobre la base de los antecedentes en el conocimiento del problema. Para el caso de este estudio en particular se dispone de la opinión del personal encargado de la realización de la metodología de costes físicos o

<sup>4</sup> En este estudio solo se tiene en cuenta el bloque de generación para la combustión de las diferentes biombras.

energéticos abordada en el apéndice anterior, y de la valoración de diversos investigadores pertenecientes al Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA) con experiencias en industrias del sector azucarero, además de una gran variedad de estudios relacionados con el tema.

Según el método AHP; las alternativas modificadas, los sub-criterios y los criterios se distribuyen en una estructura jerárquica multinivel, como se muestra en la Figura III.1.

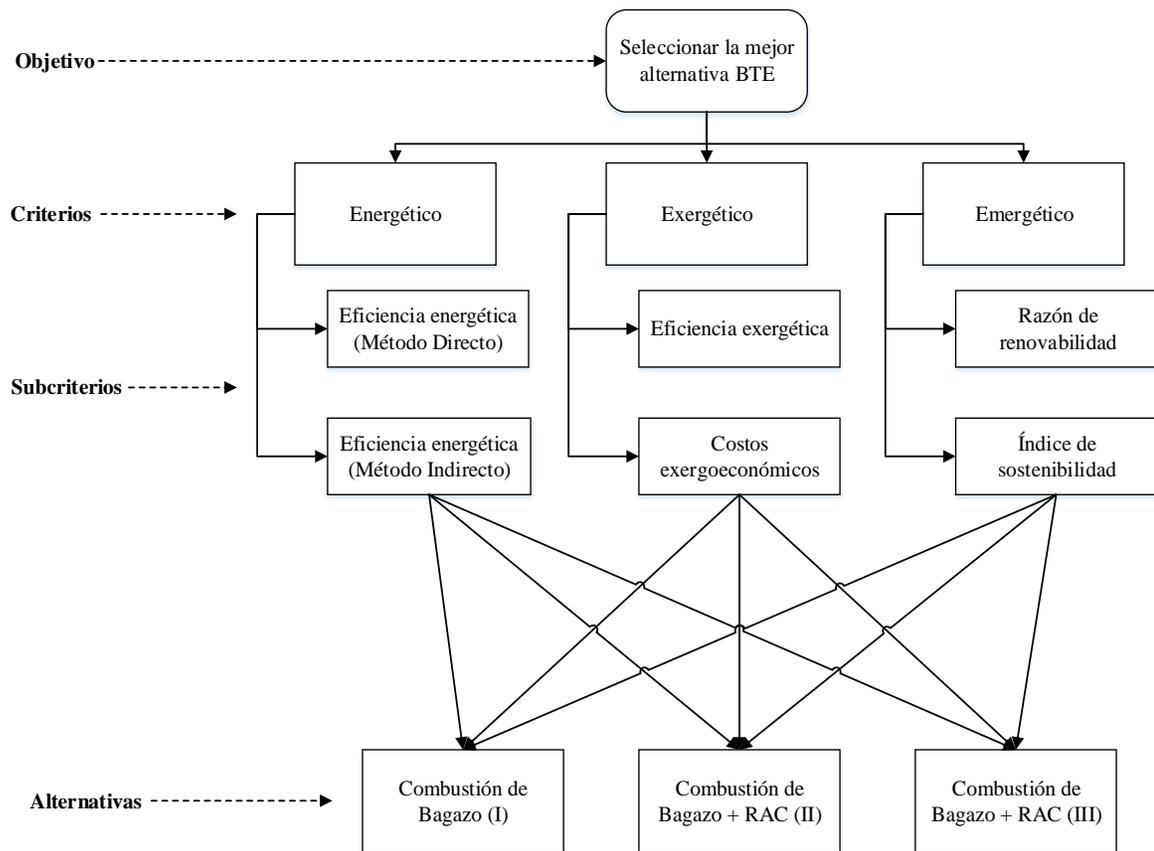


Figura III.1 Estructura jerárquica. Fuente: (Elaboración propia)

La jerarquía se organiza de tal manera que los factores principales se dividen en subfactores con alternativas en la parte inferior de la jerarquía (Figura III.1). En el modelo, los factores son considerados como un grupo. Por lo tanto, el grupo principal comprende los criterios principales de balance energético (En), exergético (Ex) y emergético (Em); el segundo grupo está formado por nodos secundarios de los criterios principales, que incluyen la determinación de la eficiencia energética por el método directo (En1) y por el método indirecto (En2), la eficiencia exergética (Ex1), los costos exergoeconómicos

(Ex2), la razón de renovabilidad (Em1), y el índice de sostenibilidad (Em2). Las alternativas consisten en la combustión de las diferentes variantes energéticas abordadas en el Capítulo anterior, es decir, combustión de bagazo (Variante I) y combustión de bagazo – RAC (Variante II y III). Las especificaciones de las alternativas de tecnología BTE utilizadas en este estudio se resumen en el apéndice III.3. Los principales criterios y sub-criterios están relacionados con las alternativas, que es su impacto en los criterios. Este modelo genera una retroalimentación o interdependencia.

### III.6 Aplicación del AHP

La matriz (Tabla III.18) se dispuso en base a los factores identificados de balance energético, exergético y emergético desarrollados en el epígrafe III.4, y la calificación numérica para la comparación de cada elemento se asignó de la escala de nueve puntos de Saaty (Tabla II.10).

En la matriz de 3x3, mostrada en la Tabla III.18, se ingresan los valores de los criterios respectivos. El valor de 1 se asigna a partir de la escala de nueve puntos cuando el criterio se compara consigo mismo, lo que hace que todos los elementos de la diagonal principal de la matriz sean 1. Por el contrario, si un criterio se compara con otros criterios en la matriz, un valor diferente a 1 se asigna de la escala de Saaty. Los recíprocos de las entradas sobre la diagonal de la matriz, se consideran las entradas de los elementos debajo de la diagonal. Por lo tanto, los juicios solo para los elementos arriba de la diagonal de la matriz deben ser solicitados. La Tabla III.18 indica que el juicio 2 ingresado en la segunda fila de la primera columna expresa que los criterios exergéticos se consideran ligeramente más importantes que los criterios energéticos. Mientras tanto, en la columna de vectores de prioridad, los criterios emergéticos se clasifican en la parte superior de los juicios, lo que muestra una mayor preocupación por la sostenibilidad (razón de renovabilidad e índice de sostenibilidad) de la tecnología BTE. Del mismo modo, se mostró preocupación por el análisis exergético y por los criterios energéticos, ya que influyeron en las prioridades. Para generar el vector de prioridad local (PVE) o el vector propio correctamente normalizado para los juicios de matriz en la Tabla III.18, se normalizan los vectores en cada columna de la matriz (dividiendo cada elemento de la columna por el total de la columna) y luego el promedio de las filas de la matriz resultante

se calcula como se muestra en la Tabla III.19. Por lo tanto, los vectores de prioridad local resultantes de los cálculos manuales se pueden dar como: (0,164, 0,297, 0,539).

Tabla III.18 Comparación matricial por pares de los criterios con respecto al objetivo. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Energético	Exergético	Emergético	Vector de prioridad (PVE)
Energético	1	1/2	1/3	0,164
Exergético	2	1	1/2	0,297
Emergético	3	2	1	0,539

Tabla III.19 Computación del vector de prioridad local. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Energético	Exergético	Emergético	Vector de prioridad (PVE)
Energético	0,167	0,143	0,182	0,164
Exergético	0,333	0,286	0,273	0,297
Emergético	0,500	0,571	0,545	0,539

Para realizar una verificación de consistencia de los juicios, primeramente, fue determinado el principio de valor propio ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) utilizando la ecuación 2.51:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix} = \lambda_{m\acute{a}x} \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,492 \\ 0,894 \\ 1,625 \end{bmatrix} = \lambda_{m\acute{a}x} \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix}$$

El valor de ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) promedio se obtiene resolviendo la matriz dada anteriormente, ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) promedio = 3,009. Por consiguiente, al utilizar la ecuación 2.52, el índice de consistencia (CI) se calcula como:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{3,009 - 3}{3 - 1} = 0,0046$$

Por lo tanto, la relación de consistencia (CR) se determinó por la ecuación 2.53:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0046}{0,58} = 0,00794 \approx 0,008 < 0,05$$

El valor de  $R/I$  es 0,58 y se seleccionó de la Tabla II.11 para  $n = 3$  (tamaño de matriz). Como el valor de  $CR$  (0,008) es menor que 0,05 (límite máximo permitido), los juicios en la matriz (Tabla III.18) se consideran consistentes y lógicamente satisfactorios. Si el  $CR$  fuese superior a 0,05, entonces los juicios en la Tabla III.18 serían inconsistentes y los tomadores de decisiones tendrían que modificar los juicios hasta que sean consistentes (Qazi et al., 2018).

La siguiente evaluación implica la comparación para derivar los efectos del sub-factor en el factor primo. En la Tabla III.20, el sub-factor En1 y En2 se comparan con respecto al criterio principal (energético). Los juicios en la Tabla III.20, indicaron que la influencia del cálculo de la eficiencia energética por el método indirecto se percibe más alto que el cálculo de la eficiencia energética por el método directo al seleccionar una tecnología de conversión. Por lo tanto, el juicio 2 se ingresa en la segunda fila de la primera columna y su recíproco se agrega en la posición transpuesta. Por otra parte, el costo exergoeconómico clasifica como el más alto, tal y como se muestra en la columna de vectores de prioridad, representando así una marcada superioridad en relación a la eficiencia exergética, debido a que en la revisión de la literatura se aprecia que los criterios económicos clasifican más alto que los criterios técnicos. Sin embargo, los sub-criterios bajo los principales criterios de energía se perciben en la matriz comparativa con una mayor influencia del índice de sostenibilidad en la toma de decisiones que la razón de renovabilidad. Los juicios en las matrices de comparación son consistentes, ya que el  $CR$  de las tres matrices es cero.

Tabla III.20 Comparación matricial por pares de los sub-criterios con respecto a criterios relativos. Fuente: (Elaboración propia)

Criterio	Criterio energético (En)		Criterio exergético (Ex)		Criterio emergético (Em)		Vector de prioridad
	En1	En2	Ex1	Ex2	Em1	Em2	
En1	1	1/2	-	-	-	-	0,333
En2	2	1	-	-	-	-	0,667
Ex1	-	-	1	1/3	-	-	0,250
Ex2	-	-	3	1	-	-	0,750
Em1	-	-	-	-	1	1/2	0,333
Em2	-	-	-	-	2	1	0,667

La etapa final implica la evaluación de la comparación entre las opciones de tecnología BTE en función de los criterios y sub-criterios individuales. Los juicios emitidos sobre las comparaciones por pares entre la opción BTE con respecto a cada criterio y sub-criterio se forjaron en base a los resultados mostrados en el apéndice III.4, y formaron seis matrices (Tabla III.21-III.26) que se evaluaron (método utilizado en la matriz de la Tabla III.19) para obtener vectores de prioridad; estas prioridades de la opción BTE con respecto a los criterios y sub-criterios se presentan en la Tabla III.27. El control de consistencia para estas matrices de comparación es mostrado en los Anexos 8-13.

Tabla III.21 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio En1.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	1/2	1/2	0,198
Variante II	2	1	1/2	0,312
Variante III	2	2	1	0,490

Tabla III.22 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio En2.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	1/2	1/2	0,198
Variante II	2	1	1/2	0,312
Variante III	2	2	1	0,490

Tabla III.23 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Ex1.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	1/3	1/5	0,110
Variante II	3	1	1/2	0,309
Variante III	5	2	1	0,581

Tabla III.24 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Ex2.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	1/3	1/4	0,123
Variante II	3	1	1/2	0,320
Variante III	4	2	1	0,557

Tabla III.25 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Em1.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	2	4	0,557
Variante II	1/2	1	3	0,320
Variante III	1/4	1/3	1	0,123

Tabla III.26 Comparación matricial por pares de las alternativas con respecto al sub-criterio Em2.

Fuente: (Elaboración propia)

Alternativa de combustión	Variante I	Variante II	Variante III	Vector de prioridad (PVE)
Variante I	1	2	3	0,539
Variante II	1/2	1	2	0,297
Variante III	1/3	1/2	1	0,164

Tabla III.27 Sumario de prioridades para pesos de factores en posibilidades de BTE. Fuente:

(Elaboración propia)

Alternativas	En1	En2	Ex1	Ex2	Em1	Em2
Combustión de bagazo (I)	0,198	0,198	0,110	0,123	0,557	0,539
Combustión de bagazo-RAC (II)	0,312	0,312	0,309	0,320	0,320	0,297
Combustión de bagazo-RAC (III)	0,490	0,490	0,581	0,557	0,123	0,164

En consecuencia, el compuesto o las prioridades finales de las alternativas se determinan sintetizando todas las matrices. La síntesis es el proceso en el cual el vector de prioridad local de alternativas se multiplica por el vector de prioridad local de cada criterio y se agrega para obtener el vector de prioridad final (peso global) de cada alternativa.

Sin embargo, cuando un criterio consiste en sub-criterios, primero la calificación de cada alternativa se multiplica por los pesos de los sub-criterios, que luego se agregan para obtener el vector de prioridad local de alternativas con respecto a cada criterio. Después, el vector de prioridad local de alternativas obtenido se multiplica por el vector de prioridad local de cada criterio y luego se agrega para obtener el peso global de cada alternativa. El criterio energético consiste en dos sub-criterios: En1 y En2, por lo tanto, el vector de prioridad local de alternativas para el criterio energético se puede determinar mediante la ecuación 3.1:

$$\begin{bmatrix} \text{Variante I} & 0,198 & 0,198 \\ \text{Variante II} & 0,312 & 0,312 \\ \text{Variante III} & 0,490 & 0,490 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{En1} & 0,333 \\ \text{En2} & 0,667 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,198 \\ 0,312 \\ 0,490 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

En consecuencia, los vectores de prioridad local de alternativas son determinados para todos los demás criterios que contengan sub-criterios (Ec 3.2 y 3.3).

$$\begin{bmatrix} \text{Variante I} & 0,110 & 0,123 \\ \text{Variante II} & 0,309 & 0,320 \\ \text{Variante III} & 0,581 & 0,557 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Ex1} & 0,250 \\ \text{Ex2} & 0,750 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,119 \\ 0,318 \\ 0,563 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Variante I} & 0,557 & 0,539 \\ \text{Variante II} & 0,320 & 0,297 \\ \text{Variante III} & 0,123 & 0,164 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Em1} & 0,333 \\ \text{Em2} & 0,667 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,545 \\ 0,305 \\ 0,150 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Posteriormente, estos vectores de prioridad local de alternativas se multiplican con los pesos de cada criterio para determinar las prioridades generales de las alternativas, que se dan a continuación en la ecuación 3.4:

$$\begin{bmatrix} 0,198 & 0,119 & 0,545 \\ 0,312 & 0,318 & 0,305 \\ 0,490 & 0,563 & 0,150 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,164 \\ 0,297 \\ 0,539 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Variante I} = & 0,361 \\ \text{Variante II} = & 0,310 \\ \text{Variante III} = & 0,329 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Usando la ecuación 3.5, las prioridades generales de todas las alternativas enumeradas en la matriz anterior poseen un valor de  $CR'$  igual a 0,017, que es inferior a 0,05, por lo que se muestra la satisfacción lógica y la coherencia de las prioridades generales (Saaty & Sagir, 2009; Qazi et al., 2018):

$$CR' = \frac{CI'}{RI'} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i CI_i}{\sum_{i=1}^n W_i RI_i} \quad (3.5)$$

donde,  $CI'$  es el índice de consistencia en todos los niveles de jerarquía,  $RI'$  es el índice aleatorio dado en la Tabla II.11 y  $W_i$  es el PVE con respecto a los criterios.

La Tabla III.28 muestra los resultados en la forma ideal, y esto se obtiene dividiendo cada prioridad por el mayor valor entre todos, que es 0,361 (Variante I). Este método hace el mayor valor ideal y para los otros se obtienen sus valores proporcionales. Por

consiguiente, los resultados muestran que la Variante III alcanza aproximadamente el 90,9% en relación a la Variante I, mientras que la Variante II alcanza solo el 85,7%.

Tabla III.28 Resultados finales en forma de prioridades normalizadas e idealizadas.

Fuente: (Elaboración propia)

Criterios/alternativas	Prioridad normalizada	Prioridad idealizada
Combustión de bagazo (I)	0,361	1,000
Combustión de bagazo-RAC (III)	0,329	0,909
Combustión de bagazo-RAC (II)	0,310	0,857

La variante I no solo demostró ser la alternativa más apropiada en las prioridades generales, sino que también clasificó como la alternativa más adecuada desde el punto de vista emergético. Sin embargo, en la clasificación de los dos criterios restantes quedo desplazada por la variante III y II. La Figura III.2 muestra los pesos locales de las alternativas bajo cada criterio de decisión.

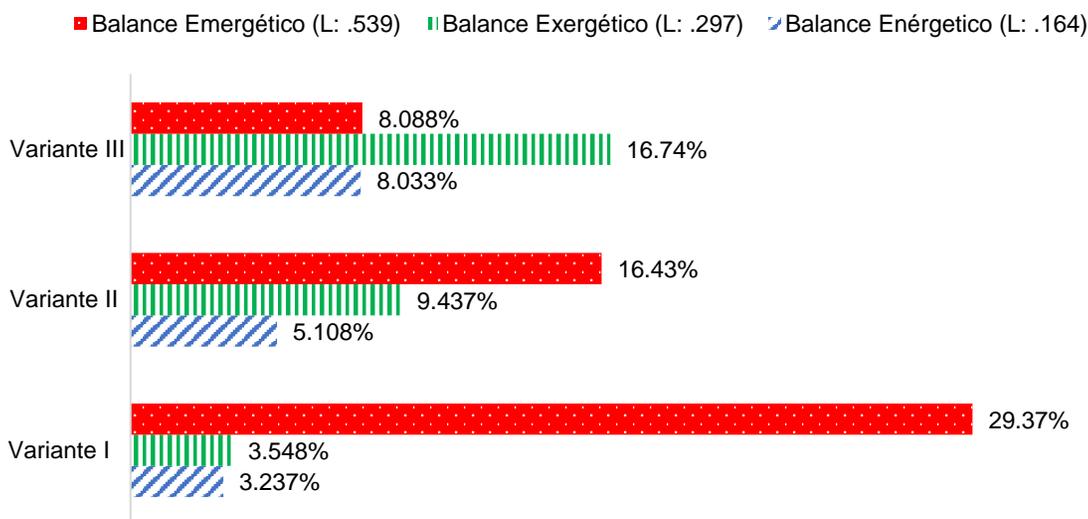


Figura III.2 Pesos locales de las alternativas bajo cada criterio de decisión. Fuente: (Elaboración propia)

Como en los problemas energéticos de toma de decisiones los juicios de los tomadores de decisiones son usualmente imprecisos, debido a que es relativamente difícil para estos proporcionar valores exactos a los criterios; a continuación, en el siguiente epígrafe se realiza un análisis de sensibilidad.

### III.6.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es esencial para observar cómo varían las clasificaciones generales de las alternativas de combustión de biomasa con respecto a cambios en las prioridades de los criterios o sub-criterios. Este análisis es muy utilizado en estudios que incluyen evaluación subjetiva para validar la solidez de los resultados (Al Garni et al., 2016).

Considerando un escenario de igual peso (33,3% para cada criterio), los resultados muestran que la variante III tiene la puntuación más alta (40,1%) entre todas las alternativas. La variante II tiene la segunda puntuación más alta (31,2%), mientras que la otra alternativa (variante I) alcanza solo el 28,7%, tal y como se muestra en la Figura III.3. Esto se debe principalmente a que la variante III clasifica como la alternativa más adecuada para los criterios de decisión energético y exergético.

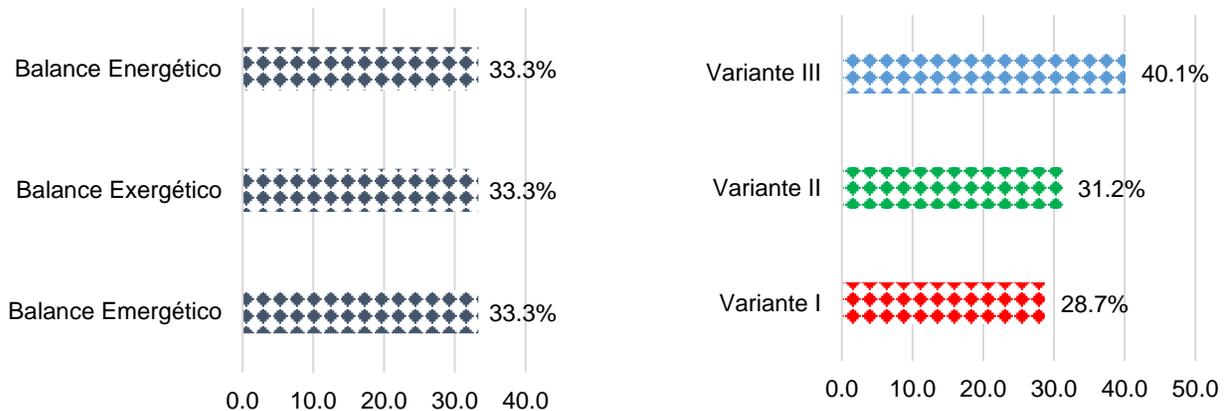


Figura III.3 Clasificación de las alternativas para criterios con igual peso. Fuente: (Elaboración propia)

Dado a que en nuestro país la agroindustria azucarera se enfrenta al reto de transitar hacia la diversificación productiva para garantizar su sostenibilidad como sistema productivo socioeconómico, a continuación, se considera un escenario de evaluación donde el criterio de análisis emergético obtiene el mayor peso (50%) entre todos los criterios investigados, ya que este es de los tres balances analizados el que evalúa la sostenibilidad del sistema. Para los demás criterios de evaluación, dígame análisis exergético y energético, se decide asignar prioridades similares (25%), por proporcionar

poca información ambiental del proceso de combustión. La Figura III.4 muestra las prioridades que brinda este escenario de evaluación.

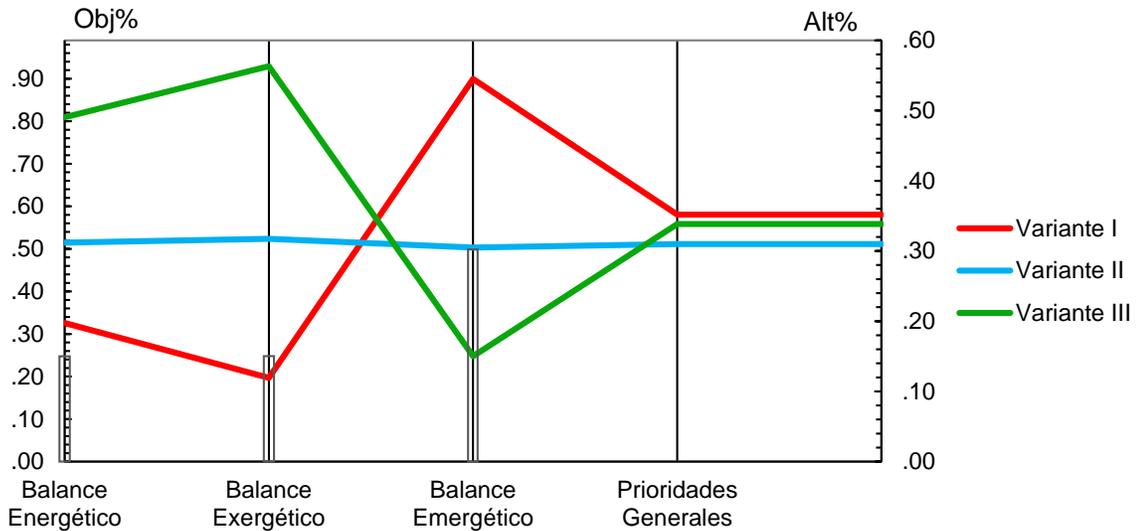


Figura III.4 Desempeño sensitivo de las alternativas con criterios emergéticos más elevados (50%).

Fuente: (Elaboración propia)

En el gráfico anterior se puede apreciar que la variante I alcanza la puntuación más alta entre todas las alternativas investigadas (35,2%) para el escenario de evaluación considerado, seguida de la variante III y II con un 33,8% y 31% respectivamente. Los resultados alcanzados en este escenario están en sintonía con los obtenidos en la evaluación realizada por los expertos, por lo que se aprecia la coherencia y la solidez de estos.

### Conclusiones parciales

1. El levantamiento de las biomásas reportó que en las tres últimas zafras la provincia de Cienfuegos contó con un total de 1 421 267 toneladas de bagazo producido, de las cuales el 95% fueron utilizadas como combustible y el resto se reportaron como bagazo sobrante. Por otra parte, el total de paja en los centros de limpieza para las tres últimas cosechas alcanzó las 234 241 toneladas, mostrando un decrecimiento significativo con el transcurso de los años.

2. El modelo AHP demostró ser una guía para la toma de decisiones con la participación de un panel de expertos para la selección de opciones BTE y para la gestión y desarrollo sostenible de la biomasa.
3. Los resultados obtenidos del análisis AHP muestran que los criterios de emergía y exergía son considerados como los factores más importantes que informan para la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa, con un PVE de 0,539 y 0,297 respectivamente, seguido del análisis energético (PVE = 0,164). Basado en estos criterios de preferencias para la evaluación del potencial de aprovechamiento de la biomasa cañera, la alternativa más adecuada para la conversión de biomasa en energía es la variante I, seguido de la variante III y II respectivamente.

## CONCLUSIONES

1. A partir de la búsqueda bibliográfica se pudo destacar la importancia de la evaluación meditada de múltiples criterios en estudios que incorporan indicadores de sostenibilidad para la evaluación del potencial de aprovechamiento de la biomasa, principalmente en países como Cuba, donde la biomasa juega un rol esencial en la planeación energética renovable, representando más del 81% del total de los recursos renovables utilizados para la generación de electricidad.
2. El desarrollo de la metodología multicriterio propuesta demostró ser una guía para la toma de decisiones y para la gestión y desarrollo sostenible de la biomasa cañera, ya que mediante la aplicación de los tres balances de costes físicos (energético, exergético y emergético) se consigue una mayor información económico-ambiental de las alternativas de combustión de biomasa cañera analizadas en este estudio, mientras que a partir del método AHP se logra comparar sobre la misma base dichas alternativas, en aras de poder decidir cuál de estas es la más favorable.
3. La aplicación del método AHP estimó los pesos locales para los criterios de energía, exergía y emergía. El vector de prioridad local calculado fue de 0,164, 0,297 y 0,539 respectivamente. Por tanto, los criterios de emergía y exergía son considerados como los factores más importantes que determinan en la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa cañera.
4. De acuerdo a las prioridades calculadas se selecciona la variante I como la alternativa más adecuada para la conversión de biomasa en energía, seguido de la variante III y II respectivamente. El análisis sensitivo para el escenario de evaluación más consecuente demostró la coherencia y la solidez de estos resultados, ratificando que en los estudios que incluyen evaluación subjetiva la selección de una determinada alternativa depende explícitamente de los juicios de los tomadores de decisiones.

## RECOMENDACIONES

- Establecer un sistema de asesoramiento de expertos que cumpla con los estándares demandados por el proceso AHP, para identificar/modificar las opciones de conversión de biomasa en energía y los factores que afectan su selección.
- Evaluar a partir de la metodología propuesta otras fuentes de biomasa existentes en el territorio, así como otras tecnologías para su aprovechamiento.
- Seguir perfeccionando las técnicas basadas en análisis de criterios múltiples para evaluar biomasa como fuente de energía, enriqueciéndola con la aplicación de modelos matemáticos.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M. & Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, 2(2019), 23-58. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6>
- Aguilar-Rivera, N. (2014). Índice de diversificación de la agroindustria azucarera en México. *Agricultura, Sociedad Y Desarrollo*, 11(4), 441-462.
- Aguilar-Rivera, N. (2015). Evaluación Emergética y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, Mexico. *Cultivos Tropicales*, 36, 144-157.
- Ahmad, S. & Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: a case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63(2014), 458–466. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.001>
- Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D. & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16(2016), 137-150. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Amer, M. & Daim, T. U. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy Sustainable Dev*, 15(2011), 420–435. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.001>
- Aras, H., Erdogmus, S. & Koc, E. (2004). Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. *Renew Energy*, 23(2004), 1383-1392.
- Arrollo, J. S. & R., W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ciencia y Tecnología*, 16, 20-29.
- Arteaga, L. E., Cabrera, J., Rodríguez, L. & Casas, Y. (2014). Termoconversión de residuos sólidos de la industria azucarera para incrementar la sostenibilidad de los procesos. *Centro Azúcar*, 41, 1-11.
- Babalola, M. A. (2015). A multi-criteria decision analysis of waste treatment options for food and biodegradable waste management in Japan. *Environments*, 2, 471-488.
- Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J. & Bajwa, S. G. (2018). A review

- of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(2018), 296-305. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. & Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82, 1451-1463.
- Beccali, M., Cellura, M. & Mistretta, M. (2003). Decision-making in energy planning application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renew Energy*, 28(13), 2063-2087.
- Bilandzija, N., Voca, N., Jelcic, B., Jurisic, V., Matin, A., Grubor, M. & Kricka, T. (2018). Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(2018), 225–230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.040>
- Blanco, A. (2018). *Situación de las energías renovables en América Latina y el Caribe*. Paper presented at the Forum “Energía Sostenible Cuba 2018”, La Habana, Cuba.
- Brown, M. T. & U., S. (2004). Energy Analysis and Environmental Accounting. In C. Cleveland (Ed.). *Oxford (United Kingdom): Elsevier*, 329-354.
- Cano, N. A. (2012). *Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburra)*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Carrasco, S. Y. (2018). *Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomásas a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal*. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Cristóbal, J. R. S. (2010). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36(2011), 498-502. doi: 10.1016/j.renene.2010.07.031
- Daniel, J., Vishal, N. & Albert, B. (2008) Evaluation of the significant renewable energy resources in India using analytical hierarchy process. In: Ehrgott M, Naujoks B, Stewart T, et al. (eds) *Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems 2008*. Proceedings of 19th international conference on multiple criteria decision making, Auckland, 7–12 January 2008. Berlin, Germany:

- Springer, 13–26.
- Di Maria, F., Sisani, F. & Contini, S. (2018). Are EU waste-to-energy technologies effective for exploiting the energy in bio-waste? *Applied Energy*, 230(2018), 1557–1572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.007>
- Diakoulaki, D. & Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost–benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 11(2007), 716–727. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.007>
- Dincer, I. & R., M. (2007). EXERGY. Energy, Environment and Sustainable Development. *United States: Elsevier*.
- Douglas, B. (2018). *Renewables 2017 Global Status Report*. Paper presented at the Cuba Sustainable Energy Forum, La Habana.
- Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P. & Vilarinho, C. (2017). Biomass resources in Portugal: Current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1221-1235. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.140>
- Gabisa, E. W. & Gheewala, S. H. (2018). Potential of bio-energy production in Ethiopia based on available biomass residues. *Biomass and Bioenergy*, 111(2018), 77-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.009>
- Gálvez, L. O. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA. (Tercera ed.). La Habana, Cuba.
- García, J. A. (2017). *Evaluación preliminar del potencial de las diferentes biomásas de la provincia de Cienfuegos*. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Georgopoulou, E., Lalas, D. & Papagiannakis, L. (1997) A multi-criteria decision aid approach for energy planning problems: the case of renewable energy option. *Eur J Oper Res*, 103(1), 38-54.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N. & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24(2019), 38–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Giuntoli, J., Agostini, A., Caserini, S., Lugato, E., Baxter, D. & Marelli, L. (2016). Climate

- change impacts of power generation from residual biomass. *Biomass and Bioenergy*, 89, 146-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.024>
- Golabi, K., Kirkwood, C. W. & Sicherman, A. (1981). Selecting a portfolio of solar energy projects using multiattribute preference theory. *Management Science*, 22(2), 174-189.
- Goletsis, Y., Psarras, J. & Samouilidis, J. E. (2003). Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups. *Ann Oper Res*, 120, 135–157. doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023330530111>
- Görener, A. (2012). Comparing AHP and ANP: An application of strategic decisions making in a manufacturing company. *International Journal of Business and Social Science*, 3, 194–208.
- Goumas, M. G., Lygerou, V. A. & Papayannakis, L. E. (1999). Computational methods for planning and evaluating geothermal energy projects. *Energy Pol*, 27, 147-154.
- Goumas, M. G. & Lygerou, V. A. (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision-making in fuzzy environment: ranking of alternative energy exploitation projects. *Eur J Oper Res*, 123, 606-613.
- Guerra, R. (2016). Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017.
- Haralambopoulos, D. A. & Polatidis, H. (2003). Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, 28, 961–973.
- Hernández, B. (2018). *Oportunidades de inversiones en Bioeléctricas*. Paper presented at the 1st International Fair “Energías Renovables Cuba 2018”, La Habana.
- Hossen, M., Sazedur, A. H. M., Kabir, A. S., Hasan, F. & Ahmed, S. (2017). Systematic assessment of the availability and utilization potential of biomass in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 94-105. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.008>
- Huang, C. L. & Yoon, K. (1981). *Multi-attribute decision making: methods and applications*. New York: Springer-Verlag.
- International Energy Agency (IEA). (2012). *Bioenergy for Heat and Power Technology Roadmap*. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012\\_Bioenergy\\_Roadmap\\_2nd\\_Edition\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Bioenergy_Roadmap_2nd_Edition_WEB.pdf).> (accessed 29.12.17).

- IRENA. (2018). *Renewable Energy Prospects for the European Union*. Abu Dhabi: IRENA. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA\\_REmap\\_EU\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap_EU_2018.pdf).
- IRENA. (2018). *Renewable Energy and Jobs - Annual Review*. Abu Dhabi (August 12, 2018): International Renewable Energy Agency. Available from: <http://irena.org/publications/2018/May/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2018>.
- IRENA. (2018). *Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050*. Abu Dhabi: IRENA.
- Jin, E. & Sutherland, J.W. (2018). An integrated sustainability model for a bioenergy system: Forest residues for electricity generation. *Biomass and Bioenergy*, 119(2018), 10-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.005>
- Jones, M., Hope, C. & Hughes, R. (1990). A multi-attribute value model for the study of UK energy policy. *J Oper Res Soc*, 41(10), 919-929.
- Jonge, S. D. (2017). Sustainable Energy. In S. E. Production (Ed.).
- Kambiz, S., Amin, K. & Shabnam, A. (2012). Application of analytical hierarchy process (AHP) technique to evaluate and selecting suppliers in an effective supply chain. *Kuwait Chapter of Arabian Journal of Business and Management Review*, 1, 119–132.
- Kaya, T. & Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35(2010), 2517-2527. doi: 10.1016/j.energy.2010.02.051
- Lapinskas, R. (2017). *The potential of bioenergy as a strategic renewable source*. Paper presented at the Advanced Biofuels Conference, Gothenburg, Finland. [www.worldbioenergy.org](http://www.worldbioenergy.org)
- Lee, A. H., Chen, H. H. & Kang, H. Y. (2009). Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. *Renew Energy*, 34, 120-126.
- Lobelles, G. O. & L., E. J. (2015). Estrategia Energética de Aguada con un Enfoque Social de la Energía, la Tecnología y la Ecología. *Cienfuegos: Universidad y Sociedad*, 7(2), 39-47.
- Lomas, P. L. (2009). *Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio*. (Tesis

- Doctoral). Universidad Autónoma de Madrid, España.
- MacDonald, A. (2018). Situación actual del proyecto Ciro Redondo. La Habana: Biopower S.A.
- Mboumboue, E. & Njomo, D. (2018). Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. *Biomass and Bioenergy*, 118(2018), 16-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.08.002>
- Michailos, S., Parker, D. & Webb, C. (2016). A multicriteria comparison of utilizing sugar cane bagasse for methanol to gasoline and butanol production. *Biomass and Bioenergy*, xxx(2016), 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.019>.
- MINAG. (2018). *Aplicaciones de las Fuentes Renovables de Energía en la Agricultura Cubana*. La Habana: MINAG.
- MINEM. (2018). Programa Energético Renovable en Cuba. In MINEM (Ed.).
- Mladineo, N., Margeta, J., Brans, J. P. & Mareschal, B. (1987). Multicriteria ranking of alternative locations for small scale hydro plants. *Eur J Oper Res*, 31, 215-222.
- Nixon, J. D., Dey, P. K. & Gosh, S. K. (2013). Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process. *Energy*, 59, 215-223.
- Odum, H. T. (1996). Environmental Accounting. Energy and Decision Making. *New York: John Wiley*.
- Oficina Estadística de AZCUBA. (2019). *Análisis multivariado de los residuos de la caña de azúcar*. Cienfuegos: Grupo Empresarial AZCUBA.
- Oman Environmental Services Holding Company (Be'ah). (2016). *Transformation of waste management in Oman*. ISWA Energy Recovery WG Meeting, 25th May 2016, West Palm Beach, Florida: Be'ah; Oman.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2017). *Anuario de Estadísticas Energéticas*. Quito: OLADE. Available at: <http://sielac.olade.org>
- Ozturk, M., Saba, N., Altay, V., Iqbal, R., Hakeem, K. R., Jawaid, M. & Ibrahim, F. H. (2017). Biomass and bioenergy: An overview of the development potential in Turkey and Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1285–1302. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.111>

- Pérez-Martínez, D. M., Contreras-Moya, A. M. & Pérez, F. (2010). Análisis de Ciclo de Vida en la Empresa Panchito Gómez Toro. *Centro Azúcar*, 37(3), 18-26.
- Perpiña, C., Martínez-Llario, J. C. & Pérez-Navarro, A. (2012). Multicriteria assessment in GIS environments for siting biomass plants. *Land Use Policy*, 31(2013), 326–335. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.07.014>
- Pohekar, S. D. & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(2004), 365–381. doi: 10.1016/j.rser.2003.12.007
- Puig, A. P. (2018). *Metodología para el análisis energético, exergético y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía*. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- Qazi, W. A., Abushammala, M. F. M. & Azam, M. H. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Management & Research*, 36(7), 594–605. doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X18777800>
- Rahman, M. M., Paatero, J. V., Lahdelma, R. & Wahid, M. A. (2016). Multicriteria-based decision aiding technique for assessing energy policy elements-demonstration to a case in Bangladesh. *Applied Energy*, 164(2016), 237–244. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.091>
- Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. & Martínez, P. B. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*: Editorial Academia
- Rojas, D. Z. (2017). *Análisis situacional para el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales del subsector de frutas y verduras en Colombia en torno a los principios del desarrollo sostenible*. (Especialista en procesos de alimentos y biomateriales). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Bogotá, Colombia.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with AHP*. Pittsburg: RWS Publications.
- Saaty, T. L. & Sagir, M. (2009). An essay on rank preservation and reversal. *Mathematical*

- and Computer Modelling*, 49, 1230–1243.
- Saaty, T. L. & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts and apps of the analytic hierarchy process*. 2nd ed. New York: Springer.
- Sánchez, V., Gutiérrez, L. F. y Osorio, J. A. (2006). Análisis emergético del policultivo de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y bocachico (*Prochilodus* sp.) en la estación Vai, municipio de el Doncello-Caquetá-Colombia. *Momentos de Ciencia*, 3(2), 116-121.
- Sindhu, S. P., Nehru, V. & Luthra, S. (2016). Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process: Indian outlook., *Energy*, 100(2016), 332–348.
- Streimikiene, D., Balezentis, T., Krisciukaitiene, I. & Balezentis, A. (2012). Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 16, 3302–3311. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.067>
- Triantaphyllou, E. & Mann, S. H. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 2, 35–44.
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235-244. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2019). *Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Valdés, A. (2017). *Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante el análisis emergético. Caso de estudio: UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”*. (Tesis de Grado). Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba.
- van Hal, A. (2017). *Estudio de viabilidad económica y técnica de la instalación de una planta fotovoltaica en la Ciudad Deportiva de Lanzarote*. (Tesis de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM), Madrid, España.
- Yamakawa, C. K., Qin, F. & Mussatto, S. I. (2018). Advances and opportunities in biomass conversion technologies and biorefineries for the development of a bio-based economy. *Biomass and Bioenergy*, 119(2018), 54-60. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.007>

Yang, Y., Ren, J., Solgaard, H. S., Xu, D. & Nguyen, T. T. (2018). Using multi-criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29(2018), 36-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.005>

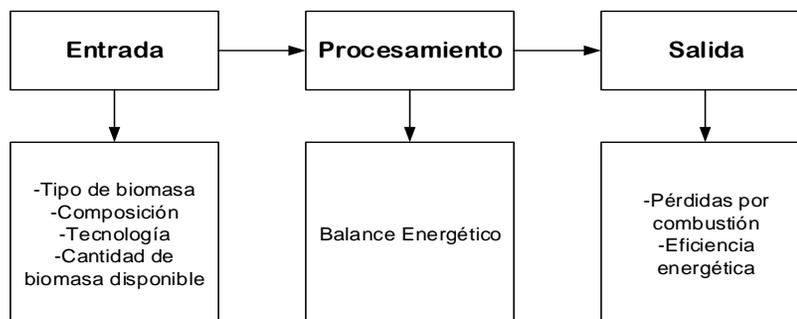
## ANEXOS

**Anexo 1:** Lista de criterios utilizados en estudios MCDM para la planeación energética.

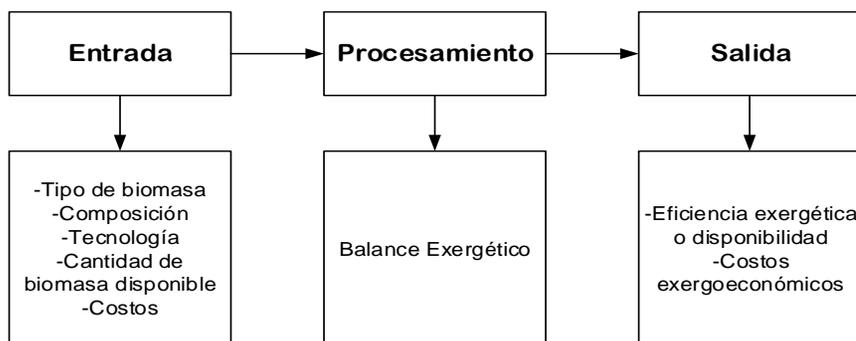
Fuente: (Kaya & Kahraman, 2010)

Aspectos	Criterios
Técnicos	Eficiencia energética Eficiencia exergética Razón energética primaria Seguridad Fiabilidad Madurez Otros
Económicos	Costo de inversión Costo de operación y mantenimiento Costo de combustible Costo de electricidad Valor neto actual Periodo de recuperación de la inversión Vida útil Costo anual equivalente Otros
Ambientales	Emisión de NO <sub>x</sub> Emisión de CO <sub>2</sub> Emisión de CO Emisión de SO <sub>2</sub> Emisión de partículas Compuesto volátiles <i>non-methane</i> Terreno utilizado Ruido Otros
Sociales	Aceptación social Creación de empleos Beneficios sociales Otros

**Anexo 2:** Esquema del balance energético en el proceso de la combustión. Fuente (Puig, 2018).



**Anexo 3:** Esquema del balance exergético en el proceso de la combustión. Fuente: (Puig, 2018).



**Anexo 4:** Producción de caña de azúcar en toneladas (t) de las últimas tres zafras. Fuente: (Oficina Estadística de AZCUBA, 2019)

Zafras	Producción (t)	Producción de caña en Cienfuegos más otras provincias (t)
2015-2016	1 523 845	1 649 816
2016-2017	1 597 797	1 710 490
2017-2018	1 047 565	1 102 232
<b>Total</b>	<b>4 169 207</b>	<b>4 462 538</b>

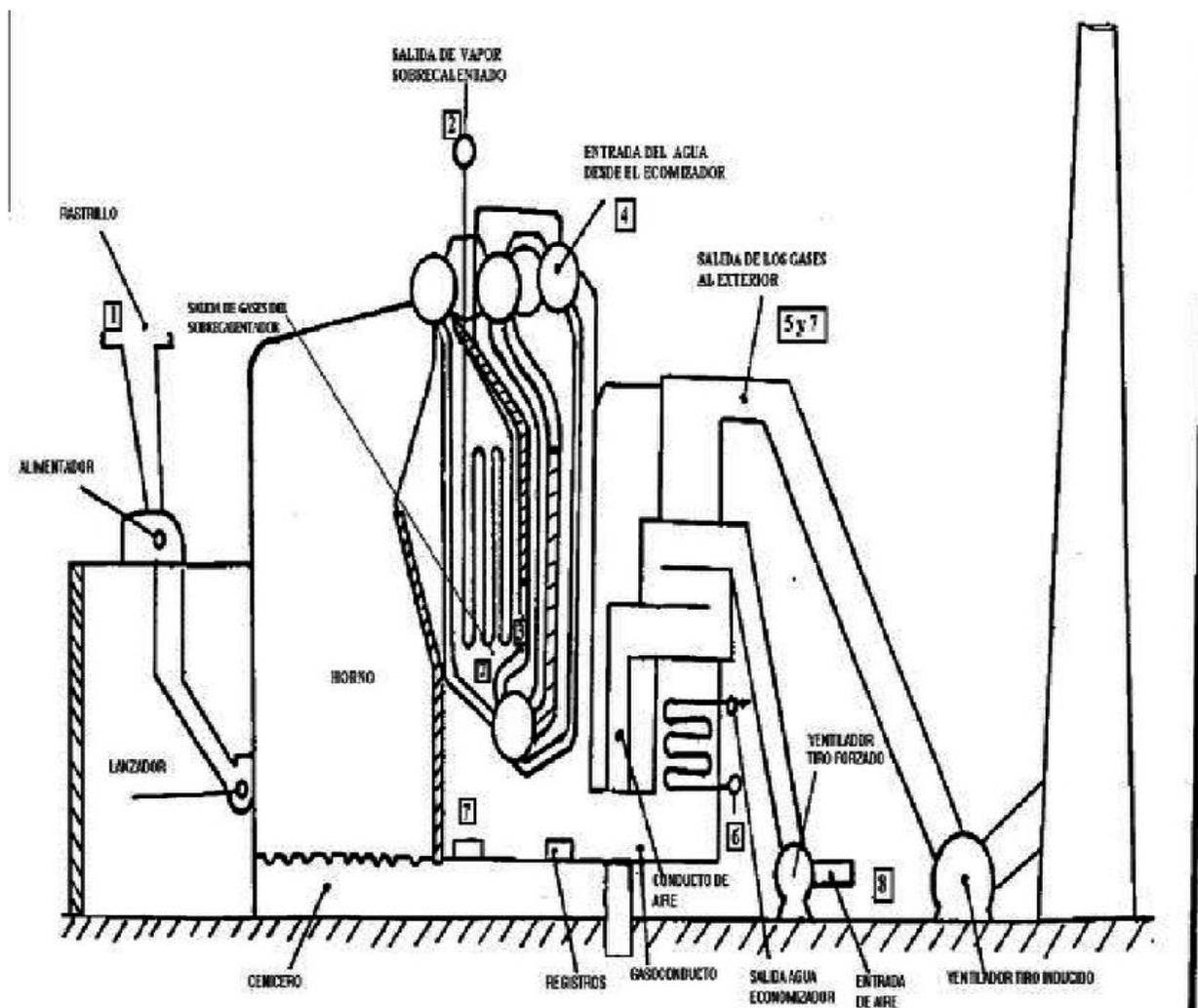
**Anexo 5:** Procesamiento de la caña de azúcar.



**Anexo 6:** Rastrillo de 4 estrellas trabajando sobre RAC de caña de azúcar previo a la recolección del mismo.



**Anexo 7:** Esquema de una caldera del tipo RETAL y las zonas que la componen: (1) humedad del bagazo, (2) temperatura y presión del vapor sobrecalentado, (3) temperatura de gases de salida del sobrecalentador, (4) Presión del vapor del domo, (5) Temperatura de gases de salida y captación de residuos volátiles, (6) temperatura y presión del agua de alimentar, (7) captación de residuos en ceniceros, (8) temperatura y humedad del aire frío.).



**Anexo 8:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.21.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,053742
Índice de consistencia (CI)	0,026871
Relación de consistencia (CR)	0,046329

**Anexo 9:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.22.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,053742
Índice de consistencia (CI)	0,026871
Relación de consistencia (CR)	0,046329

**Anexo 10:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.23.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,003696
Índice de consistencia (CI)	0,001848
Relación de consistencia (CR)	0,003186

**Anexo 11:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.24.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,018325
Índice de consistencia (CI)	0,009162
Relación de consistencia (CR)	0,015797

**Anexo 12:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.25.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,018325
Índice de consistencia (CI)	0,009162
Relación de consistencia (CR)	0,015797

**Anexo 13:** Control de Consistencia de la comparación matricial por pares mostrada en la Tabla III.26.

Principio del valor propio ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) promedio	3,009209
Índice de consistencia (CI)	0,004604
Relación de consistencia (CR)	0,007939