

República de Cuba  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD  
DEL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA COMO  
COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

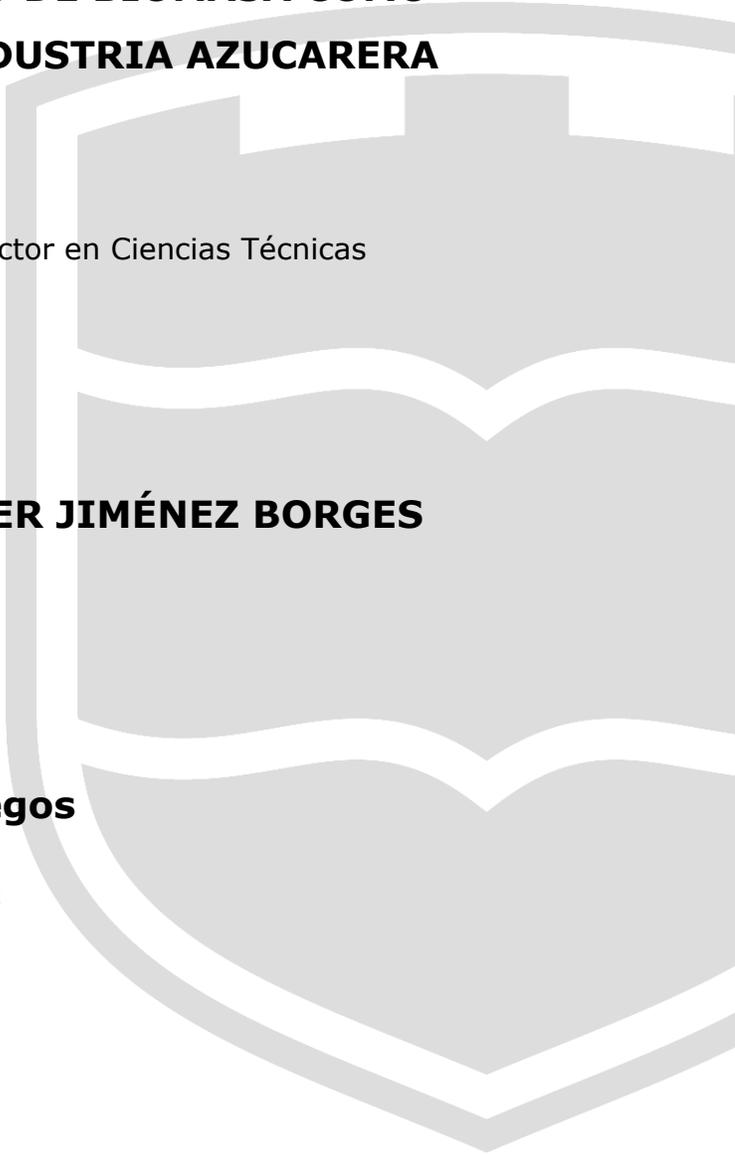
Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas

Por

**AUTOR: MSc. Ing REINIER JIMÉNEZ BORGES**

**Cienfuegos**

**2023**





**República de Cuba**  
**Universidad de Cienfuegos**  
**Facultad de Ingeniería**

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD  
DEL APROVECHAMIENTO DE BIOMASA COMO  
COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas

**Por**

**Autor: MSc. Reinier Jiménez Borges**

**Tutor: Dr.C. Eduardo Julio López Bastida  
Dr.C. Edelvy Bravo Amarante**

**Cienfuegos, 2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ver el resultado logrado con este trabajo, solamente se me ocurre una palabra: ¡Gracias!

Debo agradecer de manera especial a mis tutores los Dr. C Eduardo Julio López Bastida y el Dr. C Edelvy Bravo Amarante por aceptarme para realizar esta tesis doctoral bajo su dirección. El apoyo y confianza en mi trabajo fueron de gran aporte no solamente en el desarrollo de esta tesis sino en mi formación como investigador. Gracias por su paciencia, dedicación, motivación, criterio y aliento. Han hecho fácil lo difícil. Ha sido un privilegio poder contar con su guía y ayuda.

Gratitudes a todas las personas de la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", en especial a mis compañeros y colegas del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), perteneciente a la Facultad de Ingeniería, por su atención y amabilidad en todo lo referente a mi vida como alumno de doctorado. Quiero agradecer de manera especial al Dr. C José Pedro Monteagudo Yanes por su aporte en mi formación como profesional.

Gratitud a mi hermanito Yoisdell Castillo Alvarez por su apoyo incondicional, amistad y confianza en el resultado

Quiero agradecer al MSc Junior Lorenzo Llanes y el MSc. Arael Alfonso Cardero, MSc Andrés Lorenzo Álvarez González, Dr.C. Angela Sarria Stuart, quienes contribuyeron esencialmente en este trabajo, con sus acertados aportes.

Agradecer a la dirección de la Empresa Azucarera Cienfuegos, por su apoyo en este trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

A mi hija Dana Lía por significar todo para mí, robarme todo el tiempo y sacar lo mejor de mí en los momentos más difíciles, ella es mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y poder ser un ejemplo para ella.

A mis padres, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes, entre los que se incluye este.

A mi esposa por brindarme todo su apoyo, tolerancia e infinita paciencia

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, por creer en mí incluso cuando yo mismo no lo hacía. A mis amigos y colegas, por su inspiración, su amistad y sus valiosas contribuciones.

Dedicar este trabajo a las personas que han sido fundamentales en mi camino académico es un honor y un privilegio.

## **SINTESIS**

En la actualidad existen numerosas herramientas analíticas y/o computacionales para la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos de la biomasa en la industria azucarera, sin embargo, hasta el momento no existe una que integre desde una decisión multicriterio, simultáneamente los criterios energéticos-exergéticos y emergéticos para dicha evaluación. El objetivo del presente trabajo es proponer una metodología para evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera. Para ello, se fundamentaron teóricamente las herramientas de evaluación energética, exergética y emergética como indicadores de sostenibilidad. Los mismos fueron unificados mediante un análisis multicriterio a partir de proceso de jerarquía analítica (AHP). La metodología fue validada en cinco variantes de diferentes biomasa y sus mezclas en dos estudios de tecnologías utilizadas en Cuba para la industria azucarera. Los resultados obtenidos del análisis AHP muestran que los criterios de emergencia y exergía son considerados como los factores más importantes para la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa investigadas, con un PVE de 0,53 y 0,29 respectivamente, seguido del análisis energético (PVE = 0,16), definiendo en los estudios de casos los distintos valores de sostenibilidad para las variantes analizadas.

**Palabras claves:** biomasa cañera, energía, exergía, emergencia, sostenibilidad.

## **ABSTRACT**

At present there are numerous analytical and/or computational tools for the evaluation of sustainability based on physical costs of biomass in the sugar industry, however, so far there is not one that integrates from a multi-criteria decision, simultaneously the energy-energy and energy criteria for such evaluation. The objective of the present work is to propose a methodology to evaluate the sustainability based on the physical costs of the use of biomass as fuel in the sugar industry. For this purpose, the energy, exergetic and emergent evaluation tools were theoretically based as sustainability indicators. These were unified by means of a multi-criteria analysis based on an analytical hierarchy process (AHP). The methodology was validated in five variants of different biomass and their mixtures in two studies of technologies used in Cuba for the sugar industry. The results obtained from the AHP analysis show that the energy and exergy criteria are considered as the most important factors for the evaluation of the sustainability of the biomass investigated, with a PVE of 0.53 and 0.29 respectively, followed by the energy analysis (PVE = 0.16), defining in the case studies the different sustainability values for the variants analyzed.

**Keywords:** sugarcane biomass, energy, exergy, emergent, sustainability.

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

$\Delta\alpha$ : Infiltraciones de aire

$(c\vartheta)_a$ : Entalpía específica del aire

$(c\vartheta)_{cen}$ : Entalpía específica de la ceniza (kJ/kg)

$(c\vartheta)_{H_2O}$ : Entalpía específica del vapor de agua

$(c\vartheta)_{N_2}$ : Entalpía específica del nitrógeno

$(c\vartheta)_{RO_2}$ : Entalpía específica de los gases triatómicos

$(ct)_{esc}$ : Entalpía específica de la escoria; (kJ/kg)

$\alpha_H$ : Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno

Recursos renovables (R), no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (F)

$Q_i^t$ : Calor disponible entregado durante la combustión de la masa de trabajo del combustible o poder calórico inferior

$\bar{Y}_i^{exp}$  Media de los valores experimentales de las variables dependientes

$B_c$ : Flujo de combustible

$I_{aa}$ : Entalpía del agua de alimentar

$I_{v,s}$ : Entalpía del vapor sobrecalentado

$Y_i^{exp}$  y  $Y_i^{cal}$  son los valores calculados y experimental de las variables dependientes.

A: Matriz de comparación

$a_{arr}$ : Fracción de la ceniza del combustible que se arrastra con los gases

$A^E$  – Contenido de ceniza equivalente del combustible (% kg/MJ)

$a_{esc} = 1 - a_{arr}$ : Fracción de la escoria en la cámara del horno; (%)

$a_{esc}$ ,  $a_f$  y  $a_{arr}$ : Cantidad de ceniza en la escoria, en el foso y en el arrastre en porcentaje de la cantidad de ceniza que entra al horno

AHP: Proceso de jerarquía analítica o analytic hierarchy process.

CHP: Energía y calor combinado

$C_p$ : Calor específico de los gases de escape (kJ/kg K)

D: Capacidad de cálculo; (t/h)

$D_v$ : Generación de vapor (t/h)

DSS: Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS en inglés)

$E_{aa}$ : Exergía del agua de alimentar (kW)

$e_{aa}$ : Exergía específica del agua de alimentar; (kJ/kg)

$E_{cal_v}$ : Pérdida de exergía en el generador de vapor (kW)

$E_{combustible}$ : Exergía del combustible (kW)

$E_{combustión}$ : Exergía de la combustión (kW)

$E_{ent}$ : Exergía de las entradas

EFENER: Eficiencia energética para la simulación en Aspen Plus

EFEXER: Eficiencia exergética para la simulación en Aspen Plus

$E_{ge}$ : Exergía de los gases de escape (kW)

$E_{sal}$ : Exergía de las salidas

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

$e_{vs}$ : Exergía específica del vapor saturado (kJ/kg)

ELECTRE: Eliminación y Elección que traduce la realidad (ELECTRE en inglés)

FRE: Fuentes Renovables de Energía

G.V: Generador de vapor

$G_{arr}$ : Contenido de ceniza arrastrada por los gases

$G_{arr}^c$ : Contenido de ceniza y gases que cae en los conductos

$G_{arr}^{ch}$ : Contenido de ceniza por la que pasa a la chimenea

$G_{esc}$ : Contenido de escoria que sale del horno

$G_f$ : Contenido de ceniza que cae al foso

GWt: Gigawatts térmicos

$h_{aa}$ : Entalpía del agua de alimentación; (kJ/kg)

$h_{Comb}$ : Entalpía del combustible (kJ/kg)

$h_o$ : Entalpía a las condiciones del estado de referencia; (kJ/kg)

$I_{af}^0$ : Entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C (kJ/kg)

$I_g^0$ : Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión (kJ/kg)

$I_{exc}^a$ : Entalpía del aire en exceso (kJ/kg)

$I_{cen}$ : Entalpía de la ceniza (kJ/kg)

$I_{gsal}$ : Entalpía de los gases de salida (kJ/kg).

$i_o$ : Entalpía del estado de referencia (kJ/kg)

$I^o_a$ : Entalpía del volumen teórico de aire necesario (kJ/kg)

$i_{vs}$ : Entalpía del vapor saturado (kJ/kg)

$I_{\Delta H_2O}$ : Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso (kJ/kg)

$\dot{m}_{Comb}$ : Flujo de la combustión (kg/h)

MAUT: Teoría de la Utilidad Multi-Atributo (MAUT en inglés)

MDMC: Métodos de Decisiones Multi-Criterios

MODM: Métodos de Decisiones Multi-Objetivos (MODM en inglés)

$m_{ge}$ : Exergía específica de los gases de escape (kg/h)

$\dot{m}_{H_2O}$ : Flujo del agua de alimentar (kg/h)

$M_t$ : Miles de toneladas

$M_{toe}$ : Miles de toneladas equivalentes de combustible

$m_{vapor}$ : Flujo de vapor (kg/h)

NREL: Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL en inglés)

PVE: Vector de prioridad local

PROMETHEE: Métodos de organización de la clasificación de preferencias para las evaluaciones de enriquecimiento (PROMETHEE en inglés)

$q_2$ : Por ciento de las pérdidas por los gases de escape.

$q_3$ : Por ciento de las pérdidas por incombustión química

$q_4$ : Por ciento de las pérdidas por incombustión mecánica

$q_5$ : Por ciento de las pérdidas por enfriamiento exterior

$q_5^{nom}$ : Pérdida de calor por enfriamiento externo para capacidad nominal; (%)

$q_6$ : Por ciento de las pérdidas por calor físico de la escoria

$Q_{CO}$ ,  $Q_{H_2}$ ,  $Q_{CH_4}$ ,  $Q_{CmHn}$ : Valor calórico volumétrico de cada componente; [kJ/m<sup>3</sup>N]

$Q_d^t$ : Calor disponible de la masa de trabajo (kJ/kg)

RAC: Residuos Agrícolas de la Cosecha

RI: Índice aleatorio

$s_{aa}$ : Entropía del agua de alimentar; (kJ/kg K)

seT/unidad: semJoule solar/unidad de producto

$s_o$ : Entropía a las condiciones del estado de referencia; (kJ/kg K)

$s_o$ : Entropía del estado de referencia (kJ/kg K)

STE: Sistema Termo-Energético

$s_{vs}$ : Entropía del vapor saturado (kJ/kg K)

tc: Toneladas de caña molida

$T_{ge}$ : Temperatura de los gases de escape (K)

$T_o$ : Temperatura del estado de referencia (K)

$T_o$ : Temperatura del estado de referencia; (K)

tpe o tce: Tonelada equivalente de petróleo o tonelada equivalente de combustible

$V_a^0$ : Volumen teórico de aire ( $m^3N/kg$ )

$V_{CO}$ ,  $V_{H_2}$ ,  $V_{CH_4}$ ,  $V_{CmHn}$ : Volumen de los gases combustibles, en los productos de la combustión; [ $m^3N/kg$ ]

$V_{ge}$ : Volumen específico de los gases de escape ( $m^3/kg$ )

$V^oH_2O$ : Volumen teórico del vapor de agua

$V^oN_2$ : Volumen teórico del nitrógeno

$VRO_2$ : Volumen de los gases triatómicos

w: Vector propio correctamente normalizado (vector de prioridad).

$\alpha_{gsal}$ : Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera

$\alpha_H$ : Exceso de aire del horno

$\lambda_{m\acute{a}x}$ : Valor propio

$\rho_{ge}$ : Densidad de los gases de escape ( $kg/m^3$ )

n Número de puntos de medición

<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Problema de Investigación .....	4
Hipótesis de la Investigación .....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos específicos .....	4
Novedad científica .....	5
Alcance de la investigación .....	5
Aportes de la investigación. ....	5
<b>CAPÍTULO I. SOSTENIBILIDAD DEL USO DE LA BIOMASA COMO COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA AZUCARERA .....</b>	<b>6</b>
1.1 Conceptos generales sobre la sostenibilidad .....	6
1.1.1 Sostenibilidad de los procesos .....	6
1.1.2 Sostenibilidad basado en costes físicos .....	8
1.2 La biomasa como fuente de energía.....	10
1.2.1 Situación actual de la biomasa en el mundo y en Cuba.....	10
1.2.2 Tecnologías de conversión de la biomasa .....	15
1.2.2.1 Características fundamentales de la industria azucarera cubana..	16
1.3 Métodos de evaluación energético, exergético y emergético .....	18
1.3.1 Método energético.....	18
1.3.2 Método exergético .....	19

1.3.3 Aplicaciones de los métodos energéticos y exergéticos en los procesos de aprovechamiento de la biomasa.....	20
1.3.4 Método emergético.....	24
1.4. Métodos de selección de alternativas aplicados a las Fuentes Renovables de Energía.....	28
1.4.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP).....	32
1.5 Conclusiones parciales .....	35
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA .....</b>	<b>36</b>
2.1 Metodología multicriterial para la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos.....	36
2.2 Etapa 1. Descripción del alcance, biomasa y mezclas a evaluar.....	39
2.2.1 Descripción de las variantes de biomasa y mezclas evaluadas.....	39
2.2.2 Descripción de las tecnologías de los estudios de casos. ....	42
2.2.3 Método Delphi de evaluación de criterios.....	45
2.2.3.1 Selección del comité de expertos.....	45
2.2.3.2 Determinación de los criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación .....	47
2.3 Etapa 2. Descripción de los métodos energético, exergético y emergético.....	52
2.4 Método exergético.....	58
2.4.1 Índice de sostenibilidad exergética.....	59

2.5 Método emergético.....	60
2.6 Modelación de los indicadores energéticos-exergéticos mediante el <i>software</i> Aspen Plus .....	66
2.7 Etapa 3. MDMC para la selección de alternativa .....	67
2.8 Conclusiones parciales.....	71
<b>CAPÍTULO III. VALIDACION DE LA METODOLOGÍA. CASOS DE ESTUDIO.....</b>	<b>72</b>
3.1 Selección del comité de expertos.....	72
3.1.1 Selección de criterios y subcriterios .....	72
3.1.2 Desarrollo del método Delphi para el cribado de los subcriterios .....	73
3.2 Determinación de la eficiencia energética por el método directo e indirecto. ..	74
3.3 Análisis exergético .....	78
3.3.1 Determinación de la eficiencia exergética e índice de sostenibilidad	78
3.4 Simulación de las eficiencias energéticas-exergéticas mediante el Aspen Plus .....	79
3.5 Aplicación del método emergético .....	84
3.6 MDMC para los criterios evaluados en el estudio .....	90
3.7 Conclusiones parciales .....	96
<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>98</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

ÍNDICE DE CONTENIDO

**PUBLICACIONES, EVENTOS Y ASESORÍAS DE TESIS DE GRADO Y MAESTRÍA DEL  
AUTOR RELACIONADOS CON EL TEMA DE INVESTIGACIÓN ..... 113**

**ANEXOS ..... 116**

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1. Proyección de los indicadores de la venta de electricidad con biomasa. ....	18
Tabla 1.2. Directrices fundamentales de los métodos energéticos-exergéticos y emergéticos. ....	27
Tabla 1.3 Alcances y limitaciones para cada método propuesto. ....	27
Tabla 1.4 Lista de criterios utilizados en los mdmc para la planeación energética. ....	29
Tabla 1.5. Áreas de aplicación de los métodos multicriterios en proyectos de energía renovable. ....	31
Tabla 1.6. Proceso de jerarquía analítica en proyectos de planificación energética renovable. ....	33
Tabla 2.1. Distribución de las variantes a evaluar para los diferentes casos de estudio...	41
Tabla 2.2: Composición elemental de la masa de trabajo para el bagazo, RACs y marabú(%). ....	42
Tabla 2.3: Composición elemental de la masa de trabajo (%), de las mezclas. ....	42
Tabla 2.4 Parámetros de trabajo de un g.v tipo retal de 45 t/h. ....	43
Tabla 2.5 Parámetros de trabajo de un g.v de 235 t/h, 80 bar, 450 °c de vapor.....	44
Tabla 2.6. Escala para la determinación del coeficiente de argumentación. ....	46
Tabla 2.7. Coeficientes de significación estadística.....	47
Tabla 2.8. Frecuencias observadas con los criterios de los expertos.....	47
Tabla 2.9. Variables lingüísticas utilizadas para la evaluación de criterios.....	48
Tabla 2.10. Frecuencia observada en la evaluación de los expertos para el cribado de criterios. ....	48

Tabla 2.12. Frecuencia acumulada relativa en la evaluación de los expertos para el cribado de criterios. ....	49
Tabla 2.13. Distribución normal de la evaluación de los expertos para el cribado de criterios. ....	50
Tabla 2.14. Rangos de valoración en términos numéricos de la evaluación de los expertos. ....	51
Tabla 2.15. Pérdida por enfriamiento exterior para calderas de vapor. ....	57
Tabla 2.16 Ejemplo típico de una tabla emergética. ....	62
Tabla 2.16 Descripción de los bloques utilizados en la simulación mediante Aspen Plus. ....	67
Tabla 2.17: Escala de nueve puntos saaty para la comparación por pares. ....	70
Tabla 2.18: Valores de índice aleatorio (ri) para diferentes tamaños de matrices. ....	70
Tabla 3.1. Posibles criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación. ....	73
Tabla 3.2. Evaluación de los expertos del nivel de importancia de los subcriterios. ....	74
Tabla 3.3 Valores de eficiencia energética y bibliografía consultada. ....	78
Tabla 3.5: Valores de eficiencia exergética en función de la tecnología. Método analítico	79
Tabla 3.6 Valores de eficiencia exergética y bibliografía consultada. ....	79
Tabla 3.7: Valores de eficiencia exergética e índice de sostenibilidad en función de la tecnología. Simulación .....	84
Tabla 3.7 Principales corrientes dentro del proceso necesarias para la evaluación emergética. ....	85
Tabla 3.8 Indicadores emergéticos para el empleo de la biomasa en un G.V tipo VU-40. ....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.9. Indicadores emergéticos para el empleo de la biomasa en un G.V tipo retal... 89	89
Tabla 3.10: Comparación matricial por pares de los criterios con respecto al objetivo. .... 92	92
Tabla 3.11: Computación del vector de prioridad local. .... 92	92
Tabla 3.12: Comparación matricial por pares de los sub-criterios con respecto a criterios relativos..... 93	93
Tabla 3.13: Resultados finales en forma de prioridades general..... 94	94

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.2. Suministro energético mundial en las últimas dos décadas. .... 10

Figura 1.3 Capacidad instalada para la generación eléctrica alc [ MW, %] 2020. .... 12

Figura 1.4 Situación presente-futura de las FRE en cuba. .... 14

Figura 1.5. Variación de la potencia a la salida, eficiencia en los G.V, eficiencia energética-exergética en la cogeneración con el contenido de humedad del bagazo. .... 21

Figura 1.6 Gráfico de tgs y  $\eta$  contra % bagazo en la energía de la carga base para la relación entre el exceso de aire mínimo del quemador y el máximo del bagazo para la combinación con RAC..... 23

Figura 2.1. Diagrama heurístico de la metodología propuesta en el estudio. .... 38

Figura 2.3 Esquema típico de un G.V de 65,28 kg/s, 8 MPa, 723,15 K de vapor..... 44

Figura 2.4: Enfoque propuesto para la evaluación de alternativas mediante el AHP. .... 68

Figura 2.5: Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP. .... 69

Figura 3.1: Pérdidas de energía por el método indirecto para el G.V tipo Retal..... 75

Figura 3.2: Pérdidas de energía por el método indirecto para el G.V tipo VU-40..... 76

Figura 3.3 Valores de eficiencia energética por ambos métodos en % de las variantes evaluadas..... 77

Figura 3.4 Esquema principal para la determinación de la eficiencia energética-exergética basado en tres diferentes combustibles (Bagazo, RAC, Marabú) ..... 80

Figura 3.5. Determinación de la eficiencia energética mediante simulación en Aspen Plus. .... 81

Figura 3.6 Comparación de la eficiencia exergética mediante simulación en aspen plus. 83

Figura 3.7. Diagrama emergético para los casos de estudio..... 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.8.: Estructura jerárquica.....	90
Figura 3.8. Ponderación para un escenario con pesos similares en cada método.....	95
Figura 3.9 Análisis de sensibilidad para las variantes estudiadas considerando ambos casos de estudio. ....	96

## **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo sostenible fue definido por vez primera por el informe Brundtland, como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades" (...) (WCED, 1987).

En el campo energético esto se traduce como obtener toda la energía que utiliza el entorno de la manera más eficiente con el mínimo impacto ambiental posible.

Desde hace varios años se investiga en la evaluación de la sostenibilidad de los procesos. El *World Energy Council* (Consejo Energético Mundial) define la sostenibilidad energética como un equilibrio entre tres dimensiones: la seguridad energética, la sostenibilidad ambiental y la equidad social. Es decir, lleva el concepto de equilibrio entre las dimensiones económica, social y ambiental, por el desarrollo sostenible, al plano energético, reconociendo que la energía es clave para el desarrollo de cualquier sociedad (Gracia-Rojas, 2015).

En el caso de la sostenibilidad energética busca la reducción de la dependencia energética y la garantía de suministro, la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la competitividad en los mercados energéticos y la industria, así como, la asequibilidad de los precios de la energía para el público y la economía.

La insostenibilidad del modelo energético mundial radica en que no puede aportar un futuro confiable a la humanidad; pues, además del agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, están las crisis energéticas periódicas, con sus consecuencias sociales. La eficiencia y el uso de las fuentes renovables contribuirán de forma decisiva en el avance hacia un modelo energético más sostenible.

La sostenibilidad energética es un concepto que lleva a evaluar condiciones sociales, ecológicas, sanitarias, técnicas, económicas y financieras, directamente relacionadas con la conversión, la transmisión de electricidad, el transporte de combustibles, el suministro y el consumo de energía. Este concepto es fundamental para garantizar acceso universal a la energía.

Una forma de interpretar la sostenibilidad energética de un sistema como una magnitud a medir y cuantificar, es aceptarla como la suma vectorial de las sostenibilidades ambiental, social y económica. Sin embargo, la dimensionalidad de la sostenibilidad resulta ser muy compleja y las variables ambiental, social y económica se solapan; lo que determina que estas últimas no sean linealmente independientes, por lo que representarlas como una suma vectorial resulta muy estrecha como concepción.

Desde una perspectiva sistémica y termodinámica, puede ser aceptada la sostenibilidad de un sistema energético como la propiedad de este que refleje sus tendencias restaurativas ante las transformaciones ambientales, sociales y económicas; ocasionadas por la interacción objeto sistémico–entorno.

La sostenibilidad de un modelo o sistema energético es, de acuerdo con esta representación sistémico–termodinámica, la propiedad que sirve de eslabón mediador entre dos tendencias contrapuestas, la transformación de energía y materiales en un contexto económico, social y ambiental, que es su esencia; y la perdurabilidad de este. La primera refleja la tendencia del sistema al cambio, mientras que la segunda manifiesta la de conservación o de ser perdurable en el tiempo. Se acepta la sostenibilidad como una magnitud y es la Física como ciencia quien se encarga de la caracterización de esta, a la cual clasifica en escalares, vectoriales y tensoriales (Schoolman et al., 2012).

La conversión energética de la biomasa ha alcanzado un alto nivel de desarrollo en la vertiginosa carrera de la industria tecnológica, ante la creciente demanda de recursos y el difícil reto de evolucionar y satisfacer a usuarios cada vez más exigentes. Las tecnologías de conversión de estos combustibles se clasifican en dos grandes categorías: primera y segunda generación, que incluyen procesos termoquímicos y bioquímicos. Los procesos termoquímicos como la combustión, la pirolisis y la gasificación; se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa y están bien adaptados a la biomasa seca, en particular la paja y la madera, donde la energía contenida, es más fácil de aprovechar. En la combustión están involucrados los tres procesos mientras en los otros se crean las condiciones para obtener carbón vegetal o gas combustible.

La literatura cuenta con numerosos estudios y métodos relacionados con la estimación cuantitativa de la biomasa y su aprovechamiento con fines energéticos y exergéticos (Cavalcanti et al., 2020; Singh, 2019; Ameri et al., 2009; Barroso et al., 2003; Guerra et al., 2020; Li et al., 2017), sin embargo, no consideran en su mayoría una evaluación del impacto ambiental asociado del uso de biomasa.

Por otra parte, existen metodologías que integran diversos criterios de evaluación para el aprovechamiento de la biomasa (Retrepo, 2019). Tienen en cuenta además aspectos como el precio, la logística y la producción de biomasa, pero no evalúan los métodos energéticos, exergéticos o emergéticos (Vávrová et al., 2018; Toklu, 2017; Ferreira et al., 2017; Thomas et al., 2017; Ozturk et al., 2017; Suzuki et al., 2017; Ozoegwu et al., 2017; Ozcan et al., 2015; Gonzalez-Salazar et al., 2016).

Según Sánchez y Guerra (2022), el uso de fuentes renovables de energía en Cuba es bajo en la actualidad, ya que con ellas solo se produce el 4,3 % de la electricidad del país, donde la biomasa alcanza el 3,5 %. Especialmente para los países productores de caña de azúcar, la producción de energía a partir de biomasa cañera, compuesta por bagazo y Residuos Agrícolas de Cosecha (RACs), representa una excelente oportunidad para aumentar la eficiencia económica y proteger el medio ambiente.

No menos importante es el impacto ambiental generado por el uso de combustibles fósiles para la generación de energía, de ahí que el potencial de las fuentes renovables para el país debería permitir una mayor participación de estas en un 31 % en el futuro cercano, en particular el papel de la biomasa representará el 9 % en la generación de energía.

La política de las FRE del país hasta el 2030 proyectó la instalación de 872 MW a través de 27 proyectos bioeléctricos en ingenios azucareros, con mayores parámetros de presión y temperatura para operar más de 200 días al año con biomasa de caña de azúcar y biomasa forestal, principalmente marabú, disponible en áreas cercanas a estas instalaciones que contribuyan a la entrega de energía para el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) (MINEM, 2018).

En la actualidad a partir de dificultades tecnológicas que ha presentado la puesta en marcha de la primera bioeléctrica en "Ciro Redondo", se están valorando nuevas variantes tecnológicas menos costosas y con tecnologías más adaptadas al país que pudieran dar respuesta a estos objetivos (Rubio-González, 2023).

Por otra parte, la simulación con herramientas computacionales representa un papel fundamental en la evaluación de los procesos termoquímicos, en particular donde interviene la biomasa. El Aspen Plus es uno de los métodos computacionales para evaluar la eficiencia energética y exergética. Estudios como los de (Ong'iro et al., 1996; Sabia et al., 2019; Niu et al., 2021; Salisu et al., 2021) presentan evaluación de ciclos combinados de aprovechamiento de biomasa. Entre las ventajas de su uso se encuentran la posibilidad de optimizar resultados en cortos períodos de tiempo con alta confiabilidad en los resultados (Li, 2015; Darmawan et al., 2017; Cimini et al., 2005; Tungalag et al., 2020).

Estos estudios anteriormente mencionados en la mayoría de los casos no presentan un enfoque integral. Las metodologías analizadas no evalúan el proceso desde la sostenibilidad, no existiendo indicadores tradicionales.

Tradicionalmente, los análisis termoenergéticos de este recurso se han realizado sin un enfoque de evaluación integral, debido a la inexistencia de una metodología multicriterio que permita evaluar las mezclas de biomasa como fuente de energía desde la perspectiva energética, exergética y emergética enfocado a la industria azucarera, y además, evaluar la eficiencia y eficacia en el uso de este recurso. Por lo que se propone en este trabajo como problema científico a resolver:

### **Problema de Investigación**

¿Cómo determinar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera cubana mediante análisis multicriterio?

Para dar solución a este problema se plantea la siguiente hipótesis científica:

### **Hipótesis de la Investigación**

Es posible empleando una combinación de métodos energéticos, exergéticos, emergéticos aplicar una metodología multicriterio para evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa considerando diferentes escenarios.

Para validar la hipótesis se propone el siguiente objetivo general:

### **Objetivo General**

Proponer una metodología integrada con enfoque multicriterio para evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de biomasa como combustible en la industria azucarera.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto se plantean los siguientes objetivos específicos:

### **Objetivos específicos**

1. Valorar críticamente métodos y herramientas utilizadas en el mundo y Cuba para evaluar la sostenibilidad del aprovechamiento de biomasa como combustible.
2. Proponer una metodología que integre métodos energéticos, exergéticos y emergéticos en un análisis multicriterio, para la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos de la biomasa como combustible.
3. Validar la metodología como propuesta en dos estudios de casos de tecnologías, en variantes de usos de la biomasa en la industria azucarera cubana.

La novedad científica de la investigación reside en:

### **Novedad científica**

Se propone una metodología para evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa y sus mezclas como combustible en la industria azucarera cubana mediante análisis multicriterio, no reportada en la literatura consultada.

### **Alcance de la investigación**

Los límites de la investigación se enmarcan en evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera cubana para diferentes escenarios.

### **Aportes de la investigación.**

1. Se integran los métodos energéticos, exergético y emergético para evaluar la sostenibilidad basada en costes físicos del aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera cubana, que ofrece aportes metodológicos, ambientales y económicos que permiten comparar estos procesos.
2. Se integran las valoraciones energéticas y exergéticas para diferentes condiciones de operación y características de la biomasa mediante la simulación en Aspen Plus.
3. Se reportan indicadores emergéticos como la transformidad, para el caso del marabú como combustible adicional.

**CAPÍTULO I. SOSTENIBILIDAD DEL USO DE LA  
BIOMASA COMO COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA  
AZUCARERA**

## **CAPÍTULO I. SOSTENIBILIDAD DEL USO DE LA BIOMASA COMO COMBUSTIBLE EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

### **1.1 Conceptos generales sobre la sostenibilidad**

#### **1.1.1 Sostenibilidad de los procesos**

El desarrollo sostenible o la sostenibilidad, como categoría conceptual, consiste en reconocer el carácter limitante del patrimonio natural para lograr a la vez un crecimiento económico con equidad social y sostenibilidad ambiental; en comprender que los objetivos y metas económicas y sociales deben alcanzarse con un mínimo empleo de los recursos naturales de todo tipo, y que los residuos producidos puedan ser debidamente asimilados por la naturaleza; alcanzando una distribución equitativa y justa de las riquezas y los conocimientos, en todo lo cual intervienen diversas dimensiones más allá de las tradicionales dimensiones económica, social y ambiental.

Un modelo energético nacional orientado hacia la sostenibilidad busca la reducción de la dependencia energética y la garantía de suministro, la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la competitividad en los mercados energéticos y la industria, así como la asequibilidad de los precios de la energía para el público y la economía.

En la evolución de la concepción de sostenibilidad apareció la necesidad de formularla como una nueva ciencia, la ciencia de la sostenibilidad (Raven, 2002; Komiyama & Takeuchi, 2006; Yarime et al., 2010; Dedeurwaerdere, 2013); la cual, por su esencia, es interdisciplinaria y transdisciplinaria (Kajikawa, 2008; Schoolman et al., 2011; Lang et al., 2012).

Pero como en las ciencias naturales y la ingeniería tiene sentido lo que pueda ser medido o estimado, este nuevo campo científico necesita ser expresado cuantitativamente; es decir, ofrecerle una métrica, o bien modelarlo desde las matemáticas (Muneepeerakul & Castillo-Chávez, 2015).

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

El concepto de desarrollo sostenible entró a formar parte del vocabulario habitual a partir de la publicación en 1987 del informe << Our Common Future>>, conocido también como informe Brundtland, preparado por la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNWECD). El objetivo de esta comisión era relacionar los problemas del medio ambiente con los del desarrollo, combinando la lucha contra la pobreza con las herramientas de la economía y la ecología ( Brosowski, 2016). Si bien la definición dada en el informe como “(...) *el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades*” (...) (WCED, 1987) fue histórico y un avance significativo en la toma de conciencia, más sin embargo no brindaba pautas en cuanto a que rumbo seguir para lograrlo.

Por esto, en la Conferencia de Río de Janeiro de 1992, se conformó un plan de acción para el nuevo siglo conocido como Agenda 21 donde se estableció más precisamente que acciones debían llevar a cabo los gobiernos (de Janeiro, 1992). Con el paso del tiempo se han realizado otras reuniones como Río+10, Río+20; a principio del 2000 se establecieron los denominados Objetivos de Desarrollo del Milenio acordados a conseguir para el 2015 y ese año los líderes mundiales reunidos otra vez acuerdan para el 2030 alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Meirea, 2015). Sin embargo, a pesar de los logros alcanzados, la desigualdad de género todavía persiste, existen grandes brechas entre los hogares más pobres y los más ricos, así como entre zonas rurales y urbanas, los conflictos siguen siendo la mayor amenaza al desarrollo humano y el cambio climático y la degradación ambiental socavan el progreso logrado (Meirea, 2015).

El problema de la insostenibilidad de la sociedad industrial estriba en que, a diferencia de la biósfera, no ha sido capaz de cerrar los ciclos de materiales reconvirtiendo, con la ayuda del sol y sus derivados, los residuos en recursos. Con ello el sistema se topa con problemas de escasez de recursos y de exceso de residuos, a la vez que resulta cada vez más difícil y costoso mantener su propia calidad interna. Para los países en vías de desarrollo donde es muy costoso el acceso a los combustibles fósiles, se presenta como una alternativa manejar los criterios de sostenibilidad en la correcta utilización de los recursos naturales.

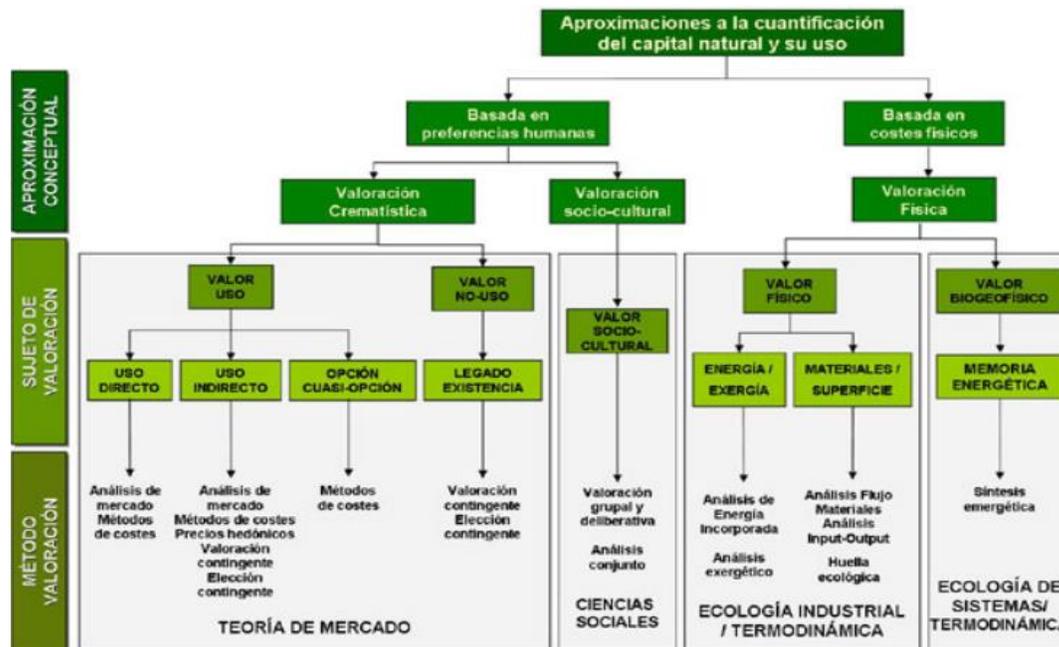
Por tanto, se puede afirmar que un sistema económico se hace globalmente más insostenible a medida que utiliza (directa o indirectamente) y degrada cantidades crecientes de la energía y los materiales extraídos de la corteza terrestre o de los

obtenidos de la sobreexplotación de ecosistemas, especies o recursos considerados renovables. Estos usos arrojan una huella de deterioro ecológico observable sobre el territorio por el espacio requerido para obtener los recursos o para depositar o digerir los residuos (Díaz & Escárcega, 2009).

Uno de los principales inconvenientes que existe en la actualidad es la dificultad de poder medir la sostenibilidad. La abundancia de medidas es un gran inconveniente, toda vez que los diferentes indicadores sintéticos transmiten mensajes muy disímiles. Ello provoca una gran confusión entre los estadísticos y los hacedores de políticas. Una amplia variedad de indicadores se encuentra disponible, pero existen razones del por qué una evaluación integral de la sostenibilidad es difícil de establecer en una forma totalmente consensuada. La evaluación de la sostenibilidad requiere de muchos supuestos y de elecciones normativas, y se complejiza aún más por la existencia de las interacciones entre los modelos socioeconómicos y medioambientales que desarrollan los diversos países. El problema es realmente complejo, más complejo que el ya complicado asunto de medir el bienestar o el desempeño actual (Sen, 2010).

### **1.1.2 Sostenibilidad basada en costes físicos**

Existe una relación directa entre desarrollo sostenible y el deterioro que en ocasiones provoca el incremento de las actividades extractivas e industriales sobre la capacidad de recuperación y regeneración de los ecosistemas que proveen los servicios ambientales (Leff, 2022). Por otra parte, en algunos casos los principios de protección ambiental aún se consideran una limitación al desarrollo económico y social, lo que ha condicionado la capacidad pública para detener el creciente deterioro de ecosistemas críticos y controlar la contaminación. Resulta imprescindible entonces poder cuantificar el capital natural y su uso. De acuerdo con Montes (2007) existen dos maneras de cuantificar dicho capital natural, basado con preferencias humanas y en costes físicos (ver figura 1.1).



**Figura 1.1.** Integración de las aproximaciones para la cuantificación del capital natural y su utilización. **Fuente:** Montes (2007).

El capital natural basado en preferencias humanas puede ser aproximado y cuantificado mediante el valor desde la teoría de mercado y desde la percepción sociocultural y la deliberación grupal. El primero plantea la existencia de formas de valor no captadas por el mercado (valores de uso indirecto y de no uso), proponiendo métodos de valoración capaces de captar dichos valores, a menudo mediante la simulación de mercados hipotéticos. La economía ambiental complementa así el marco analítico neoclásico, pero sin transgredir las fronteras reservadas al ámbito de la crematística, es decir, el ámbito de la valoración monetaria. De acuerdo con las preferencias humanas, este método no exige necesariamente recurrir a la monetización de las distintas opciones de cara a su comparación, ya que permiten orientar la toma de decisiones en base a la ordenación de preferencias a la que lleguen los actores tras un proceso de deliberación, ya sea este individual o grupal (Montes, 2007).

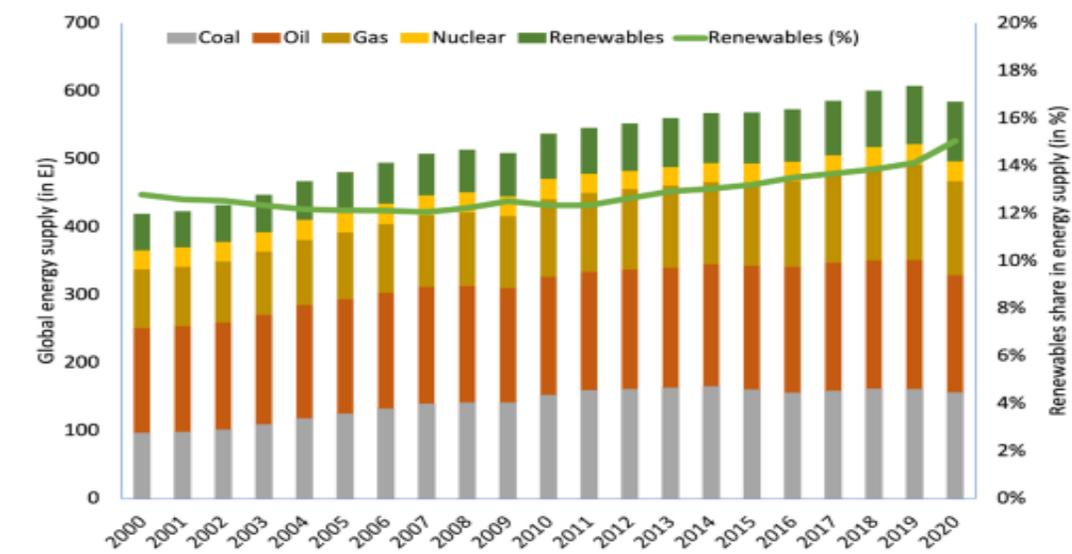
La aproximación basada en costes físicos descansa principalmente sobre el primer y segundo principio de la termodinámica y sobre la ecología de sistemas. Esta toma en consideración los análisis de energía incorporada, análisis exergético y la síntesis emergética a partir de la ecología de sistemas, aportando la memoria energética de los procesos y sistemas. Estudia también desde la ecología industrial los análisis de flujo de materiales, los costes energéticos invertidos en un determinado proceso, siendo el

análisis de energía incorporada el método más conocido. Además, analiza el coste exergético de reposición (costes en energía utilizable o no disipada) que implica la utilización del capital natural. Por último, está basada en la ecología de sistemas, y cuya principal diferencia frente a otros estudios de análisis energético reside en su capacidad de discernir entre distintas calidades de energía y hacer explícita las relaciones entre el sistema económico y el sistema biogeofísico.

## 1.2 La biomasa como fuente de energía

### 1.2.1 Situación actual de la biomasa en el mundo y en Cuba

Los combustibles fósiles dominan el suministro energético mundial. En 2020, el suministro total de energía primaria fue de 585 EJ, con una cuota del 80 % de combustibles fósiles (27 % de carbón, 29 % de petróleo y 24 % de gas). Las tecnologías de energías renovables (solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica, etc.) representaron el 15 % del suministro de energía primaria en 2020, lo que supone un aumento del 0,9 % respecto al año anterior. La figura 1.2 presenta el suministro energético mundial en las últimas dos décadas.



**Figura 1.2.** Suministro energético mundial en las últimas dos décadas. **Fuente:** Statista (2022).

En el año 2020, el suministro de biomasa fue de 57,5 EJ en todo el mundo. El 86% del suministro nacional procedía de fuentes de biomasa sólida, incluidas las astillas de madera, los pellets de madera y las fuentes tradicionales de biomasa. Los

biocombustibles líquidos representaron el 7 %, los sectores de residuos municipales e industriales supusieron entre el 2 % y el 3 %, seguidos del biogás con un 2 %. En 2019, la biomasa sólida, predominantemente del sector forestal, constituyó la mayor parte del suministro de biomasa en todos los continentes. Europa representó el 64 % de toda la energía procedente de residuos municipales. Europa también fue líder en el suministro de biogás, con más de la mitad del suministro mundial de biogás. Por su parte, América (principalmente EE.UU. y Brasil) tuvo un importante suministro de biocombustibles líquidos, con un 70 % del suministro mundial (Statista, 2022).

La agricultura es un sector clave para aumentar el potencial de utilización de la bioenergía en el futuro. Aunque el sector representa alrededor del 10 % del suministro mundial de biomasa, existe un importante potencial para aumentar su contribución. En cuanto a los rendimientos de los principales cultivos, existe un potencial significativo para aumentar los rendimientos en varias regiones hasta la media mundial.

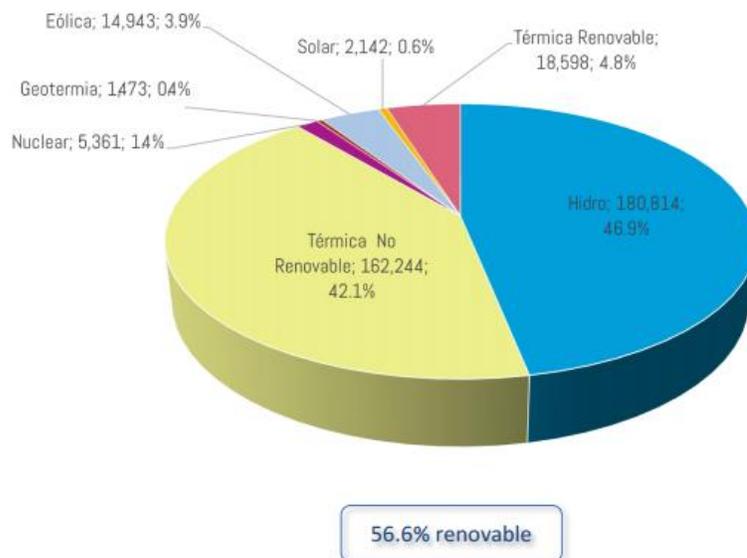
En 2020, se generaron 685 TWh de electricidad a partir de biomasa en todo el mundo. El 69 % de toda la bioenergía generada procedía de fuentes de biomasa sólida, seguida del 17 % de residuos municipales e industriales. La cuota del biogás fue del 13 %.

Asia representó el 39 % de toda la bioenergía generada a nivel mundial con 255 TWh de producción en 2019, seguida de Europa con el 35%. Europa lidera el mundo en bioenergía producida a partir de residuos municipales con un 64 % de la producción, mientras que Asia lidera el uso de residuos industriales para electricidad, con una cuota global del 71 %. La bioenergía a partir de biogás domina en Europa, con una cuota mundial del 72 %.

Sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico y diversos autores como (Dolf Gielen et al., 2019) son del criterio de que las FRE pueden suministrar dos tercios de la demanda energética mundial, y contribuir en la reducción de los gases de efecto invernadero, lo cual constituye una necesidad en un período de tiempo hasta el 2050 para limitar el incremento promedio de la temperatura de la superficie por debajo de 275,15 K (2 °C).

Con estos desafíos, concuerda también, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA,2020), la cual expresa que la transición hacia las FRE 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.

El caso de América Latina y el Caribe (ALC) es paradigmático, ya que su matriz eléctrica está compuesta principalmente de fuentes renovables, derivadas de la abundancia de recursos hídricos, representando este el 46,9 %. Para ALC la utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) dentro de la capacidad instalada para la generación de energía representa el 56,6 % (Figura. 1.3). Si bien esta característica parece distinguir a la región, ella no está exenta de los problemas inherentes al crecimiento constante de la demanda energética.



**Figura 1.3** Capacidad instalada para la generación eléctrica ALC [ MW, %] 2020.

**Fuente:** González (2020).

En el caso de Cuba, Hidalgo (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 Korkeakoski y Filgueiras Sainz de Rozas (2022); 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.

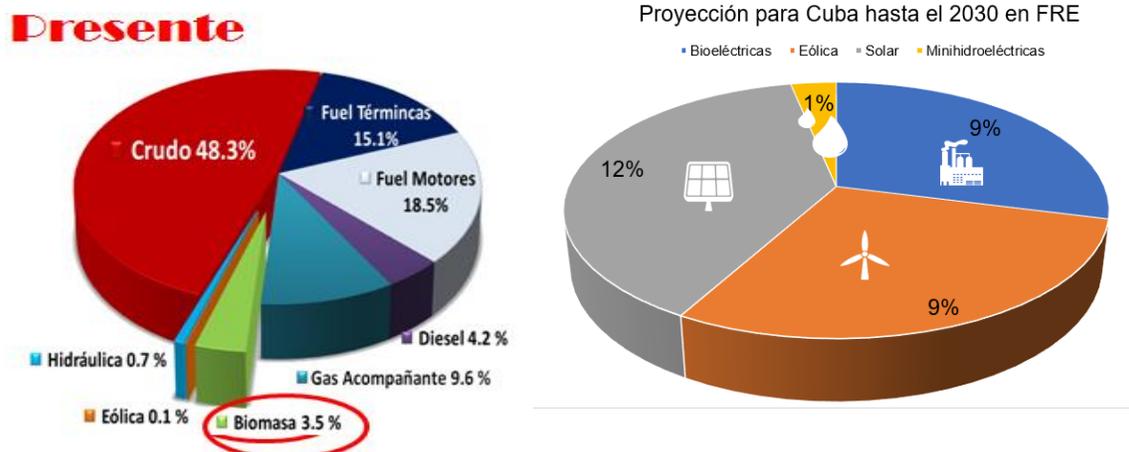
- Elevar la eficiencia en la generación y en el consumo de la electricidad, logrando la reducción de los costos del kWh entregado por el Sistema Energético Nacional (SEN).
- Elevar la sustentabilidad medioambiental y reducir la contaminación.

No obstante, a partir de un diagnóstico de la situación actual, y de la necesidad de revertir, paulatinamente, al 2030, la situación que hoy vive el país existe una nueva propuesta de política para la transición energética con miras incluso hasta el 2050 (MINEM, 2023; Cuba, P. y. G. d., 2023).

Dicha política contempla fundamentalmente:

- Incrementar la participación de las FRE en la generación eléctrica hasta un 31 %.
- Producir 9 960 GWh/año con FRE.
- Sustituir 2,3 millones de toneladas de combustible/año.
- Dejar de emitir a la atmosfera 8,5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

En el caso de la biomasa como combustible esta política (Figura 1.4) de acuerdo con (Hernández, 2018; Korkeakoski & Filgueiras Sainz de Rozas, 2022; MINEM, 2023; Cuba, P. y. G. d., 2023) señalan como se encuentra la situación de las FRE en el presente y como se esperan para el 2030 logrando, un incremento de la eficiencia energética que es necesidad y además una oportunidad de inversión fundamentalmente en la industria azucarera, donde se prevé la biomasa como fuente de energía alcance un 9 % dentro de la matriz energética del país. Destacar además como esta penetración energética que se pretende alcanzar con la utilización de las FRE debe, como bien plantea la política del gobierno, garantizar la sostenibilidad medioambiental en consonancia con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030.



**Figura 1.4** Situación presente-futura de las FRE en Cuba. **Fuente:** (Korkeakoski & Filgueiras Sainz de Rozas 2022; MINEM, 2023; Cuba, P. y. G. d., 2023)

La situación futura de la generación de energía con biomasa de acuerdo con Rubio González (2021) se ha visto comprometida por varias razones. Entre ellas:

1. Contenido de humedad: la biomasa debe tener un contenido de humedad relativamente bajo para que se quemen de manera eficiente. Si la biomasa contiene demasiada agua, la combustión no será completa y se producirán emisiones de humo y otros gases contaminantes.
2. Calidad de la biomasa: la calidad de la biomasa puede variar mucho, lo que puede afectar su capacidad para quemarse de manera eficiente. La biomasa de baja calidad puede tener un contenido de madera blanda y resinas que producen más ceniza y otros residuos.
3. Disponibilidad de biomasa: Aunque son una fuente de energía renovable, la disponibilidad de esta puede ser limitada en ciertas regiones. Además, se puede producir una competencia para el uso de la biomasa entre otros sectores, como la agricultura y la industria alimentaria. En Cuba, es vital la necesidad de recuperar el sector de la caña de azúcar para disponer de suficiente biomasa cañera en la producción de electricidad.
4. Impacto ambiental: aunque la combustión de biomasa es más limpia que la quema de combustibles fósiles, todavía se producen emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Además, la producción de la biomasa que se utilizan como combustible puede tener un impacto ambiental negativo si no se gestionan adecuadamente.

5. Coste: el coste de la producción de biomasa y su almacenamiento puede ser más elevado que el de los combustibles fósiles, lo que puede hacer que la energía obtenida a partir de biomasa no sea rentable en algunos casos. Por otro lado, los altos costos de inversión inicial de las tecnologías de alta presión, ha hecho pensar en la búsqueda de tecnologías menos costosas.

6. Aún no se valora adecuadamente el efecto de la sostenibilidad en el uso de las FRE, no existe una integración de criterios para evaluar las mismas desde una perspectiva técnico-ambiental que garantice la correcta utilización de la biomasa como fuente de energía en la industria azucarera.

### **1.2.2 Tecnologías de conversión de la biomasa**

Dentro de las tecnologías fundamentales de conversión están presentes la combustión, gasificación, pirolisis, digestión anaeróbica, etc (Ahrenfeldt et al., 2013; Chen et al., 2018; Chan et al., 2019; Dornburg & Faaij, 2001). Cada una de ellas presenta sus propias ventajas y desventajas a su vez que cuenta con una amplia variedad de productos obtenidos a partir de estas tecnologías de conversión (Vigot et al., 2018; Choudhary et al., 2020; Abreu et al., 2016; Nussbaumer, 2010; Peterson, 2009; Seabra & Macedo, 2011).

La tecnología de combustión convierte el combustible en varias formas de energía útil (aire caliente, agua caliente, vapor, electricidad). Las unidades de combustión industriales y comerciales pueden quemar varios tipos de biomasa (residuos agroforestales-desechos sólidos municipales, etc.) (Cadham et al., 2016). La combustión de la biomasa facilita la generación de electricidad desde una turbina –generador con una eficiencia de conversión entre 17 y 25 % (Toklu, 2017; Caputo et al., 2005).

Varios procesos industriales requieren calentamiento ininterrumpido, mientras que, otros procesos requieren de calentamiento preciso (Larsson et al., 2021). La tecnología de combustión puede satisfacer una amplia variedad de demanda desde pocos kilowatts hasta varios megawatts, pero la selección de esta tecnología no solo depende de la demanda sino de las características de los combustibles a emplearse, costo, rendimientos, etc (Malico et al., 2019; Abdalla et al., 2018).

Este tipo de tecnología es utilizada para el calentamiento directo en la producción de calor a temperaturas bajas y medias, dado que el equipo o tecnología transfiere el calor directamente del flujo de gases para el proceso. Una alternativa de la producción de calor a elevadas temperaturas es la co-combustión con carbón (combustión simultánea de los

dos combustibles), ampliamente utilizado en la generación de electricidad con un favorable impacto ambiental (Gerssen-Gondelach et al., 2014; Koppejan & Van Loo, 2012).

La combustión indirecta generalmente ocurre a temperaturas medias y bajas. Los Generadores de Vapor (G.V) es la tecnología de mayor empleo para la conversión de biomasa sólida en energía térmica en la mayoría de las industrias. Para el caso de sistemas de pequeñas potencias (<20 MW<sub>t</sub>) se emplean generalmente G.V de parrilla fija, y para potencias superiores (>20-30 MW<sub>t</sub>) los G.V de lecho fluidizado (Malico et al., 2019). La combustión de la biomasa pulverizada es usualmente empleada en grandes estaciones de potencia térmica para la generación de electricidad (Krishnamoorthy, & Wolf, 2015).

Típicamente los G.V de parrilla fija son utilizados para pequeñas capacidades en comparación con los de lecho fluidizado, presentan costos inferiores, pero también bajas eficiencias. El tipo de combustible y el coeficiente de exceso de aire juega un papel fundamental en dicha eficiencia (combustibles con bajos valores calóricos y elevado contenido de humedad presentan una eficiencia de un 25 % menor que aquellos combustibles con bajos contenido de humedad y elevado poder calórico, cada 15 % de reducción de exceso de aire resulta en un incremento de 1 % en la eficiencia (Heat, 2007).

### **1.2.3 Características fundamentales de la industria azucarera cubana**

Actualmente en la industria azucarera cubana se dispone aproximadamente de 57 fábricas de azúcar, incluida una bioeléctrica que opera a presión de vapor de 9 MPa y temperatura de 813 K. De los 56 centrales azucareros restantes 45 (79 %) operan a presiones de 1,8 MPa y temperatura 653,15 K, 11 (21%) a 2,8 MPa y temperatura de 673,15 K. Se disponen de 144 generadores de vapor, de ellos 108 operan a 1,8 MPa y temperatura de 653,15 K y 36 a presión de 2,8 MPa y temperatura de 673,15 K. Además, el 60 % de los turbogeneradores instalados son de 4 MW o mayores. Si bien la capacidad instalada se redujo en 247,5 MW con relación a 1991, por el proceso de redimensionamiento del sector, el índice de generación se ha duplicado hasta 38 kWh/t de caña molida en las últimas zafras, resultado de los esfuerzos dirigidos a mejorar el balance energético en las fábricas.

La potencia instalada al cierre de 2010 era de 497,50 MW con un consumo anual del sector, incluyendo su propia generación, de 830 GWh, del cual se aportan al SEN 310 GWh.

El programa de desarrollo azucarero en el país para el 2030 tiene como tendencia la diversificación de sus producciones para aprovechar al máximo las potencialidades con que cuenta esta industria llamada a ser uno de los renglones estratégicos del país.

Esta diversificación puede lograrse con el aprovechamiento de los jugos de caña para la producción de azúcar, mieles y alcohol. Los dos primeros utilizados como alimento humano y el último para la producción de vinazas. Mientras que el bagazo ampliamente utilizado para la generación de energía térmica sigue siendo clave en la producción de energía eléctrica tanto para consumo propio como para la venta de excedentes al SEN (Rubio-González y col.,2018); Rubio-González y col.,2021).

Una de las estrategias del país es la generación de electricidad con el aprovechamiento de la biomasa, para lo cual sería necesario incrementar las producciones de caña dentro del país, así como, otra biomasa que pueda ser utilizadas como combustibles.

En tal sentido se trazaron como estrategias fundamentales las siguientes (Sánchez Abreu, 2018).

- Montaje de bioeléctricas en los primeros 17 centrales previstos, priorizando aquellos con disponibilidad de biomasa.
- Elevar la capacidad de generación en los 40 centrales que no montarán bioeléctricas a partir de un estudio y programa de sustitución de equipos de su base energética.

Este programa debe permitir un número de metas para los próximos años que garanticen, además, el incremento de energía a la red nacional. La tabla 1.1 resume parte de los indicadores propuestos para los años venideros, en comparación con el año base 2020.

Como se ha mencionado anteriormente, se hace necesaria la búsqueda de variantes tecnológicas propias que garanticen precios inferiores, suministro de combustibles suficientes y garantía de la sostenibilidad de los procesos.

**Tabla 1.1.** Proyección de los indicadores de la venta de electricidad con biomasa.

Metas/Indicadores	UM	Año Base	Metas por año		
			2021	2025	2030
Generación eléctrica	GWh	578,3	1123	1992	4621
Índice de generación	kWh/tcm	34,1	42,2	48,6	69,4
Penetración matriz energética	%	3,7	4,2	10,5	14,0
Ahorro de combustible fósil	tce	152,2	287,8	510,5	2 555,5
<b>Venta de electricidad a la UNE</b>	<b>GWh</b>	<b>76,3</b>	<b>470</b>	<b>1 042</b>	<b>3 135</b>
Autoabastecimiento Eléctrico	%	96	156	193	262
Consumo de agua externa	m <sup>3</sup> /tcm	0,6	0,55	0,4	0,2

**Fuente** (Programa Azucarero, AZCUBA 2020)

### **1.3 Métodos de evaluación energético, exergético y emergético**

#### **1.3.1 Método energético**

Uno de los principales problemas que tiene todo el desarrollo energético de la biomasa es la carencia de una metodología que evalué integralmente la sostenibilidad basada en costes físicos. Generalmente los estudios consultados presentan indicadores o métodos de manera aislada sin una evaluación multicriterial del fenómeno. Una sola herramienta de evaluación no es capaz de evaluar integralmente los procesos de aprovechamiento de dicho combustible. Los métodos energéticos y exergéticos son comúnmente aplicados a estos procesos con carácter complementario para estimar cantidad y calidad de la energía en dichos procesos fundamentalmente.

La termodinámica permite analizar el comportamiento, rendimiento y eficiencia que pueden presentarse en diferentes sistemas de conversión de energía total de una forma a otra.

El balance de energía en el proceso de combustión se refiere a la cantidad de energía total que se produce y se consume durante dicho proceso. En la combustión, el combustible reacciona con el oxígeno para producir dióxido de carbono, agua y energía. La cantidad de energía liberada durante la combustión puede ser determinada por el calor de combustión del combustible.

El balance de energía en el proceso de combustión es importante para garantizar un flujo estable y seguro de energía, ya sea para producir calor, luz o energía mecánica. El conocimiento del balance de energía es esencial para diseñar sistemas de combustión eficientes y seguros en aplicaciones como motores de combustión interna, calderas, hornos y turbinas de gas. Como métodos fundamentales para la estimación del balance de energía en un G.V se encuentran los métodos directo e indirecto propuesto por Rubio-González (2015).

Un análisis energético de un sistema de conversión de energía es esencialmente un balance de la energía total que entra y sale del sistema, donde la determinación de la eficiencia es utilizada para evaluar las cantidades de energía y la comparación de varios sistemas energéticos (Dennis, 2019).

### **1.3.2 Método exergético**

El balance de exergía en la combustión de biomasa por su parte se puede expresar como la relación entre la exergía útil (energía térmica aprovechada) y la exergía total (energía disponible total) en el proceso. El objetivo es maximizar la exergía útil y minimizar la exergía perdida.

En resumen, el balance de exergía en la combustión de biomasa es importante para evaluar la eficiencia del proceso y maximizar la cantidad de energía térmica útil que se produce a partir de la biomasa. Es necesario tener en cuenta los valores de exergía del combustible, la combustión y el calor residual para optimizar el proceso y reducir las pérdidas de energía.

Los análisis exergéticos por su parte son una poderosa herramienta para desarrollar, evaluar y mejorar los sistemas de conversión de la energía. En la actualidad la mayor parte de los sistemas energéticos son desarrollados desde el punto de vista de este criterio, sin embargo, las pérdidas energéticas que toman lugar en él, pudieran ser determinadas mediante un análisis exergético. De acuerdo con Terzi (2018) los beneficios del análisis exergéticos son numerosos comparados con los análisis energéticos, los más significativos son:

- Los métodos exergéticos ayudan a evaluar los valores termodinámicos de las formas de energía en sistemas complejos con múltiples productos (ejemplo plantas de cogeneración, trigeneración)
- Pueden utilizarse para la evaluación económica-medioambiental.

- La exergía puede mejorar la comprensión de los términos de conservación de la energía y de crisis energética.
- Los métodos exergéticos ayudan a optimizar actividades.

### **1.3.3 Aplicaciones de los métodos energéticos y exergéticos en los procesos de aprovechamiento de la biomasa**

Existen estudios donde se han realizado valoraciones energéticas y exergéticas, además de considerar criterios ambientales en la evaluación de los procesos de aprovechamiento de la biomasa.

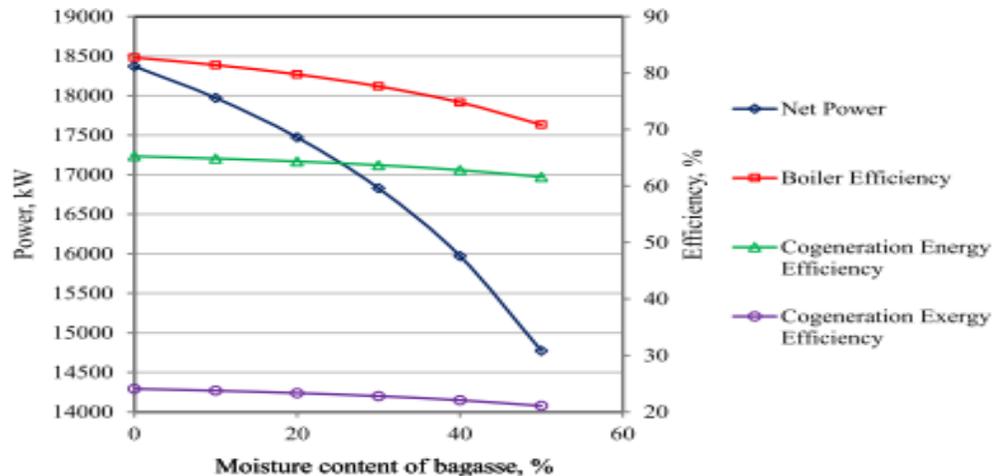
El desarrollo de un modelo para varias plantas de potencia analizando los balances de masa, energía y exergía fue propuesto por Terzi (2018), tomando en consideración los criterios de eficiencia térmica, exergética y destrucción de la exergía. Fue demostrado que la mayor pérdida exergética ocurre en la cámara de combustión del G.V. Sin embargo, el modelo se restringe solo a estos criterios de evaluación, no enfatizando desde la perspectiva sustentable los procesos que intervienen, no considerando además el análisis energético ni la integración de estos métodos.

Por otra parte (Golato et al., 2008) desarrollaron un método matemático determinístico aplicable a un sistema G.V-precalentador de aire en estado estacionario, que operaba con uno o dos combustibles simultáneamente, para determinar la eficiencia térmica del mismo, sin embargo, el estudio no contempla las pérdidas exergéticas de cada una de las variantes consideradas además, no incluye una evaluación ambiental de los combustibles considerados en el estudio con el propósito de analizar la sostenibilidad de los mismos, por otro lado, no contempla la utilización de otras biomasa como pueden ser los RAC o el Marabú.

En el estudio energético y exergético en una fábrica de azúcar propuesto por (Abreu et al., 2018), los autores se refieren a que las mayores pérdidas exergética debido a las irreversibilidades, ocurren significativamente en los G.V de bagazo, donde las mismas representan el 97 % de la pérdida exergética total en la fábrica, mientras que la turbina presenta la más alta eficiencia energética. Resulta importante entonces dentro del esquema termoenergético de la fábrica analizar el proceso de combustión, no solo con el fin de disminuir las pérdidas exergéticas sino evaluar alternativas como puede ser la incorporación de algún combustible adicional.

Singh (2019) por su parte realizó un estudio energético-exergético de una planta de cogeneración de 16 MW en una fábrica de azúcar. Fue estimado que la mayor pérdida

energética y destrucción de exergía se encontraron en el horno del G.V respectivamente, resultados similares a los reportados por (Cavalcanti et al., 2020). El autor demuestra como la reducción del contenido de humedad del bagazo permite incrementar la eficiencia energética-exergética en el sistema de cogeneración, demostrándose además que el 6,34 % de la energía del combustible se pierde a través de los gases de escape. La figura 1.5 presenta como influye el por ciento de humedad del bagazo en la eficiencia de los generadores de vapor.



**Figura 1.5.** Variación de la potencia a la salida, eficiencia en los G.V, eficiencia energética-exergética en la cogeneración con el contenido de humedad del bagazo.

**Fuente:** (Singh, 2019)

Cabe destacar que para un contenido de humedad del 50 % la eficiencia energética del G.V evaluado en dicho estudio, se presenta en el orden del 72 %, de acuerdo con la figura anterior. Sin embargo, dicho análisis no contempla ningún criterio medioambiental de evaluación para esta tecnología, y solo incluye el bagazo de caña como combustible.

Tradicionalmente las fábricas de azúcar en Cuba han sido equipadas con G.V de baja eficiencia, desde los sistemas de combustión en pila hasta los spray-stoker que permiten incrementar la eficiencia.

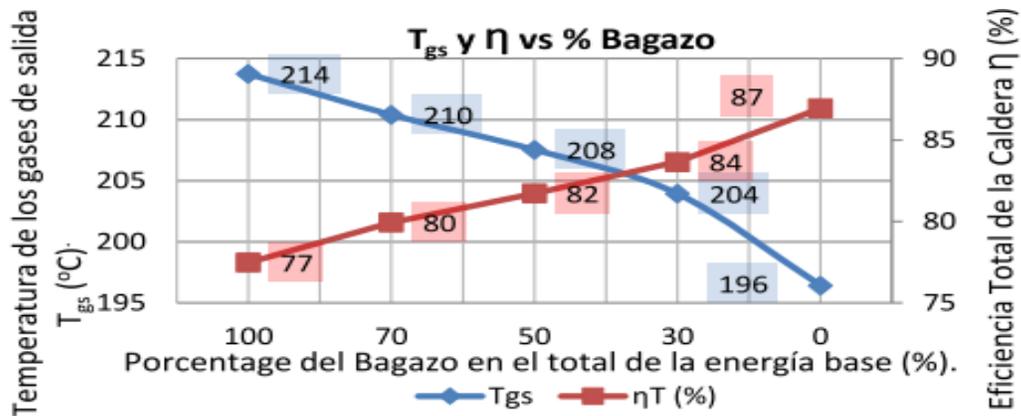
Barroso et al (2003) evalúan un G.V del tipo Retal utilizado en la industria azucarera cubana. Este estudio en particular presenta una optimización en el diseño de un generador Retal usando bagazo como combustible para mejorar la eficiencia en las fábricas de azúcar cubana, prestando especial atención en la influencia del coeficiente de exceso de aire con la temperatura de los gases de salida. Cabe resaltar que únicamente

el enfoque del estudio es la optimización energética, sin embargo, no se maneja ningún criterio de sostenibilidad en el proceso utilizando el bagazo como combustible, además no considera evaluar energéticamente otra biomasa disponible.

Ameri et al (2009) realizan un análisis energético, exergético y exergo económico de una planta de potencia. Fueron calculadas las pérdidas de exergía de cada componente, específicamente la eficiencia exergética del G.V a diferentes temperaturas ambientes, demostrándose que la reacción de combustión a altas temperaturas es la fuente de destrucción de exergía más significativa en dicho equipo, así como presenta los mayores costos exergo económicos.

Para la evaluación del proceso de co-combustión de biomasa a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal, Rodríguez Arias et al (2019) proponen una metodología. Esta evaluó la combustión del bagazo con un combustible adicional (RAC y Meollo). Se demostró que es posible disminuir el exceso de aire utilizado en la combustión implementando la quema combinada en la caldera Retal al quemar el combustible adicional con los quemadores desarrollados por las Tecnologías de las Secciones de Paso en Rotación, lo que garantiza una reducción de las pérdidas por los gases de escape y por tanto, un aumento en la eficiencia de la caldera.

El autor demuestra que para la combustión de bagazo 100 % se alcanzan eficiencias energéticas de un 77 %. La figura 1.6 demuestra como a medida que disminuye el porcentaje de bagazo en la combinación lo hace además la temperatura de los gases de salida y de forma inversa la eficiencia del G.V incrementa su valor, llegando incluso, con 100 % de RAC, hasta 87 %. Sin embargo, no fue considerado el aspecto ambiental en la combustión del bagazo ni el criterio emergético, con la incorporación de dos combustibles adicionales dentro de la metodología propuesta.



**Figura 1.6** Temperatura de los gases de salida y  $\eta$  contra % Bagazo en la energía de la carga base para la relación entre el exceso de aire mínimo del quemador y el máximo del bagazo para la combinación con RAC. **Fuente:** (Rodríguez Arias et al., 2019)

Velásquez Arredondo (2009) realiza un estudio para determinar la eficiencia exergética en una fábrica de azúcar, como resultado fundamental fue la determinación de la eficiencia exergética para varios escenarios.

En el estudio considerado por Alves (2015) se analiza la entrega de electricidad para diferentes esquemas de cogeneración en la industria azucarera considerando como combustibles bagazo y residuos de la cosecha (RAC). El autor demuestra como con la tecnología de extracción-condensación se logran excedentes superiores de energía eléctrica (23 %) que con la tecnología de contrapresión (10 %), para un comportamiento más favorables con el bagazo que considerando la evaluación de los RAC.

Golato et al (2017) realizaron un estudio preliminar para el aprovechamiento energético de los RAC, con el objetivo de reemplazar el gas natural que es utilizado como combustible adicional. Los ensayos preliminares realizados mostraron que es posible quemar mezclas de bagazo con RAC en calderas bagaceras convencionales. Para una relación en peso de 75 % de bagazo y 25 % de RAC se obtuvo una combustión estable, y se alcanzó una eficiencia térmica en el G.V de un 71,6 % coincidiendo con (Singh, 2019; Barroso et al., 2003), además, mayor en un 5 % en relación a la eficiencia energética obtenida utilizando únicamente bagazo, demostrándose la validez de incorporación de un combustible adicional.

(Guerra et al., 2020) igualmente consideran 10 escenarios de evaluación de la eficiencia exergética en el proceso de combustión, cada escenario corresponde a un nivel de presión-temperatura para el G.V, así como la utilización de bagazo y RAC como

combustibles. Para condiciones de 2 MPa a 683,15 K, la eficiencia exergética de la mezcla bagazo-RAC fue siempre inferior que para la combustión solamente de bagazo. Esto ocurre porque el estimado de esos parámetros dependen del balance entre las fuentes de energía, calor (como vapor del proceso) y electricidad en el generador. Las eficiencias exergéticas se comportaron entre 25,2 % y 35,4 %. Este estudio una vez que analiza más de un combustible no brinda un enfoque multicriterial en la evaluación de ambas biomasa, no siendo suficiente con el criterio exergético decidir la fuente de biomasa más sostenible dentro del proceso de aprovechamiento de energía en un G.V. Amarante (2019) plantea, que los estudios exergéticos pueden brindar una información importante en cuanto a la sostenibilidad del proceso de aprovechamiento de biomasa, para ello propone dos nuevos indicadores denominados índice de sostenibilidad exergética y consumo acumulado de exergía, los cuales se justifican por permitir realizar un balance de gases de efecto invernadero entre los que genera el proceso productivo y los evitados por la no generación de electricidad en una planta térmica convencional a partir de combustibles fósiles.

#### **1.3.4 Método emergético**

Uno de los enfoques que desde hace algún tiempo toma especial interés en la evaluación de los impactos ambientales asociados al aprovechamiento de los recursos lo constituye el método emergético.

La emergía por su parte es la suma de toda la energía de una forma, necesaria para desarrollar un flujo de energía de otra forma, en un período de tiempo dado. Esta herramienta es utilizada para comparar la obra de la naturaleza con la de los humanos (Izursa Azurduy, 2011).

La primera formalización de esta idea se llevó a cabo a partir del trabajo de Odum (1973), donde señalaba que *“La energía se mide en calorías, BTUs, kilovatios-hora y otras unidades indiscutibles, pero existe una escala de calidad de la energía que no está contenida en estas medidas. La capacidad para desarrollar trabajo para el hombre depende tanto de la cantidad como de la calidad de la energía, y se mide mediante la cantidad de energía de un grado de calidad bajo que es necesaria para generar otra de un grado mayor”*.

Esto implica que un Joule de energía solar, un Joule de carbón o un Joule de electricidad, aunque representan la misma *cantidad* de energía (un Joule), no representan la misma *calidad*, en el sentido del potencial que tienen estos distintos tipos de fuentes energéticas

para actuar sobre el conjunto del sistema, es decir, en la necesidad que el sistema tiene de recibir mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas.

Entonces se pueden comparar diferentes tipos de energía utilizando factores de conversión, que muestran la cantidad de tipos de energía equivalentes. Al conectar diferentes tipos de energía, se pueden asociar varias partes y visualizar la complejidad de una manera sencilla, utilizando diagramas, a partir de los cuales se hacen cálculos de flujos y depósitos (Odum, 1996).

Gran parte del concepto de energía es el concepto de transformidad, la cual se define como la energía de un tipo requerida para hacer una unidad de energía de otro tipo (Odum, 1996). Para poder transformar las diferentes calidades de energía a la calidad de energía solar correspondiente, se usa el factor de equivalencia transformidad, que informan qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesaria para generar una unidad de energía de mayor calidad. Por tanto, la transformidad tiene unidades de seJ/unidad de energía (Lomas, 2009).

La selección de la energía solar como la energía de referencia, es debido a que es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecósfera en la tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero debido a que fluye en el tiempo y espacio, tiene una baja calidad en comparación a otras formas de energía de la tierra derivadas desde ésta (Álvarez et al., 2006; Brown & Ulgiati, 1997).

De hecho, es común utilizar diferentes métodos de evaluación del impacto ambiental potencial. Cavalcanti et al (2020) presentan un análisis energético, exergético y exergo-medioambiental de un sistema de cogeneración de bagazo, este último utilizando como método el Eco-indicador 99. Como resultados de los balances relacionado con los impactos medioambientales, estos fueron superiores los que se encontraban asociados con la destrucción de exergía. El estudio evalúa solo la utilización de bagazo, a pesar de considerar los aspectos energético, exergético y exergo-medioambiental, no incluye una valoración emergética del proceso, además no presenta un enfoque para la evaluación de la sostenibilidad del bagazo ni la posibilidad de incorporación de algún combustible adicional en el estudio.

Por su parte, Gil et al. (2013) evalúan y comparan los impactos medioambientales del ciclo de vida de diferentes tecnologías de cogeneración empleadas en fábricas de azúcar cubanas, para ello fueron estudiados una combinación de nueve G.V y ocho

turbogeneradores a través del Eco-indicador 99 y el *software* Simapro. Como resultado se demostró que la categoría de daño a la salud humana presenta los mayores impactos en la etapa de cogeneración, representando el 80 % de los impactos medioambientales totales del proceso. Las emisiones del material particulado durante la combustión del bagazo fue la de mayor contribución a esa categoría. Sin embargo, carece de una evaluación energética y exérgica de las diferentes tecnologías de combustión consideradas en dicho estudio.

Para evaluar la sostenibilidad del proceso de producción de azúcar crudo a partir de la caña de azúcar de un central azucarero, Jiménez Borges et al (2020) aplicaron la metodología emergética para evaluar las corrientes de entradas y salidas del proceso agro-industrial. Se cuantificaron además las transformidades de los principales productos del caso de estudio evaluado. Sin embargo, el autor no integra de manera simultánea los métodos energéticos, exérgicos y solamente considera el bagazo de caña como combustible.

Con el propósito de determinar que biomasa presentan un mejor comportamiento dentro del proceso de aprovechamiento de energía en un G.V Jiménez Borges et al (2020) evaluaron la sostenibilidad para la biomasa cañera (bagazo y RAC) a partir del método de jerarquía analítica AHP como método de selección de alternativa. Los resultados obtenidos del análisis muestran que los criterios de emergía y exérgía son considerados como los factores más importantes para la evaluación de la sostenibilidad de la biomasa. La Tabla 1.2 presenta las direcciones fundamentales de trabajo en relación con los métodos energéticos, exérgicos y emergéticos.

**Tabla 1.2.** Directrices fundamentales de los métodos energéticos-exergéticos y emergéticos.

<b>Método Energético-Exergético</b>	<b>Método Emergético</b>
Fundamentalmente se enfocan en la determinación de eficiencias en G.V, equipos auxiliares, ciclos de calor y electricidad combinados.	Todos siguen la metodología dada por Odum (1996) para la cuantificación de indicadores emergéticos.
Determinación de las irreversibilidades mediante balances exergéticos. Valoran varios combustibles dentro del G.V como son bagazo, RAC, no incluyen en ningún caso el marabú, ni combinaciones de mezclas, así como tampoco la caña energética.	Dicha metodología es poco utilizada en la industria azucarera considerando el sistema agro productivo.

**Fuente:** (Elaboración propia)

La tabla 1.3 presenta para cada uno de los métodos analizados en este estudio los alcances y limitaciones con el propósito de destacar la importancia de la inclusión simultánea de estos en la evaluación de la sostenibilidad. Dennis (2019) coincide con las diferencias fundamentales presentadas en los métodos energéticos y exergéticos en cuanto a alcance y limitaciones de cada uno de ellos.

**Tabla 1.3** Alcances y Limitaciones para cada método propuesto.

Métodos	Alcances	Limitaciones
Energético	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Se basa en el primer principio de la Termodinámica.</li> <li>✓ Evalúa cantidad de la energía total.</li> <li>✓ Calcula pérdidas del sistema.</li> <li>✓ Fácil comprensión del fenómeno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No tiene en cuenta la entropía.</li> <li>• No evalúa calidad de la energía.</li> <li>• Proporciona poca información económico-ambiental.</li> <li>• Presenta un análisis centrado en las pérdidas.</li> </ul>
Exergético	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Se basa en el segundo principio de la Termodinámica.</li> <li>✓ Realiza un fuerte análisis termo-económico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suma diferentes calidades de energía.</li> <li>• Presenta una mayor dificultad en la comprensión del fenómeno.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Proporciona información termo-económica.</li> <li>✓ Estudia el uso de la energía útil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil análisis ambiental.</li> <li>• No evalúa ni el tercer ni el cuarto principio de la termodinámica.</li> </ul>
Emergético	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Se basa en el tercer y cuarto principio de la termodinámica.</li> <li>✓ Evalúa la sustentabilidad del sistema.</li> <li>✓ Transforma todo a una misma calidad de energía.</li> <li>✓ Amplia gama de indicadores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una complicada comprensión del término.</li> <li>• No evalúa cantidad de energía.</li> </ul>

**Fuente:** (Elaboración propia).

El método emergético supone la contribución más novedosa desde la Ecología a los modelos de evaluación energética y exergética, e incluye una serie de particularidades que lo hacen sumamente interesante a la hora de complementar otros métodos ya existentes y de suplir las deficiencias de muchos de ellos. Es el único método que caracteriza los procesos ecológicos dentro del marco de la economía, ya que está fundamentado, entre otras disciplinas, en la ecología de sistemas y en la energética de ecosistemas lo que representa la expresión más completa de una teoría energética del valor incorporando indicadores económicos, ambientales y sociales (Lomas, 2005). Además, frente a otros análisis energéticos, este método considera distintos tipos de calidades energéticas y tiene factores de estandarización para la conversión y el manejo de unidades comunes, considerando tanto fuentes de energía renovables como no renovables, así como también las energías puramente ambientales que intervienen en los procesos (radiación solar, energía eólica, mareal, etc.), teniendo como enfoque fundamental la sostenibilidad de los procesos o sistemas.

#### **1.4. Métodos de selección de alternativas aplicados a las fuentes renovables de energía**

En varios estudios las técnicas de optimización han sido aplicadas para el manejo de la biomasa desde puntos de vistas operacional, táctico y estratégico, muchos de estos estudios están basados en programación matemática, técnicas heurísticas y simulación (Rahimi et al., 2016; Marinakis et al., 2017)

**Tabla 1.4** Lista de criterios utilizados en los MDMC para la planeación energética.

<b>Criterios</b>	<b>Subcriterios</b>
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 Labor humana Otros

**Fuente:** Kaya & Kahraman (2010)

En la Tabla 1.4 anterior, se listan los criterios y subcriterios más utilizados en la planificación energética, aunque existen investigaciones como la de Michailos et al. (2016), que incorpora indicadores de exergía total, eficiencia ambiental y financiera. El número de subcriterios analizados varía en función de los expertos (tomadores de decisiones), existen trabajos como el de Perpiña et al. (2012), que llegan a comparar un total de 13 factores, de los cuales cinco son ambientales, seis económicos y dos sociales. Por su parte, las concepciones para clasificar las alternativas van desde conjeturas que expresan que la dimensión económica es la principal conductora para la difusión de las fuentes de energía renovables (Yang et al., 2018), hasta otras que afirman que los encuestados (comité de expertos) deben estar más preocupados por la contaminación (criterios ambientales) de la tecnología que por los criterios técnicos, económicos y sociales (Qazi et al, 2018).

La evaluación multicriterio en muchos casos finaliza con un análisis de sensibilidad como el último paso en los problemas de toma de decisiones. Dentro de los métodos propuestos se encuentran los Procesos de Jerarquía Analítica (AHP por sus siglas en inglés), Electre, Teoría de Utilidad Multi-Atributo (MAUT por sus siglas en inglés), PROMETHEE, TOPSIS y UTA. De estos son el método AHP, MAUT y Promethee cuyas áreas de aplicación son las energías renovables los más utilizados. Es necesario para los estudios de planificación local considerar igualmente los criterios de sostenibilidad dentro de las alternativas a evaluar por algún método de selección multicriterio, ya que no solo importan los criterios energéticos como base para la toma de decisiones.

Una de las etapas más importantes del proceso de análisis de decisión multicriterio es la selección de los criterios y subcriterios, esto tiene un efecto considerable en todo el proceso de evaluación y los resultados pueden ser sesgados por la inclusión o exclusión de ciertos parámetros de decisión; por lo que se hace necesario establecer un sistema de asesoramiento de expertos para identificar/modificar los factores que afectan la selección de las alternativas a evaluar.

Las áreas de aplicación de los MDMC 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 para la clasificación de las alternativas son la optimización multi-objetivo, AHP, PROMETHEE, ELECTRE, MAUT, métodos difusos y los sistemas de apoyo a la decisión (DSS en inglés). La Tabla 1.5 muestra las áreas de aplicación de estos métodos en proyectos de energía renovable.

**Tabla 1.5.** Áreas de aplicación de los métodos multicriterios en proyectos de energía renovable.

<b>Método</b>	<b>Área de aplicación</b>
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.

**Fuente:** (Cristóbal, 2010).

La complejidad de los procesos de decisión una vez que se consideran múltiples criterios demandan para su conducción un procedimiento estructurado que permita la suficiente robustez y rapidez para la consecución de los resultados de acuerdo con las exigencias del problema. Una fortaleza principal del método AHP es su capacidad para integrar opiniones subjetivas de tomadores de decisiones. Eso lo ha hecho muy atractivo para combinar con otras metodologías desarrolladas para gestionar datos objetivos, resulta simple, intuitivo, fácil de entender con un mínimo entrenamiento y suficientemente flexible para abordar diferentes problemas. Es más que una metodología para situaciones de elección, debido a sus tres funciones básicas de estructuración de la complejidad, medición en escalas y síntesis.

Este método, además de permitir dividir el problema de toma de decisiones en una jerarquía de criterios, subcriterios y alternativas que facilita la comprensión y análisis del problema con una mayor organización, también desglosa el problema en partes más manejables y a identificar sus relaciones. Utiliza escala de comparación relativa para valorar la importancia o preferencias de los criterios y alternativas de manera más precisa y consistente, a diferencia de otros métodos que utilizan escalas ordinarias, el AHP proporciona un enfoque más riguroso y matemático considerando la incertidumbre y la subjetividad mediante la asignación de pesos a los criterios evaluados. El AHP tiene mecanismos incorporados para garantizar la consistencia y la adecuación de las comparaciones realizadas por los tomadores de decisiones, a través del cálculo de la consistencia de las valoraciones pueden ser identificadas discrepancias y errores en las preferencias establecidas. En resumen, este método ofrece una estructura jerárquica, escala de comparación relativa, capacidad de manejar la incertidumbre y subjetividad, y mecanismos para garantizar la consistencia y robustez en el proceso de toma de decisiones, lo que hace para el contexto tratado sea superior a otros métodos de toma de decisiones.

#### **1.4.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)**

En el Proceso de Jerarquía Analítica 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 subcriterios a niveles y subniveles de la jerarquía respectivamente, y las alternativas de decisión en la parte inferior de la jerarquía (Saaty, 2000; Ali et al., 2023). 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 et al., 2016); además suele ser utilizado en proyectos para la selección de sitios con potencial eólico 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). Diversos investigadores coinciden en que la técnica AHP es la técnica más utilizada entre

los MDMC para la planificación energética renovable. Michailos et al (2016) a partir de un análisis de decisión multicriterial presenta una metodología para la factibilidad de utilización del bagazo. La misma tiene en cuenta además un análisis exergético, una evaluación económica y la determinación de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitidos y valora la factibilidad de utilización como metanol para gasolina o para la producción de butanol. El autor no incluye indicadores emergéticos en su estudio, no tiene en cuenta además el potencial energético del bagazo y no considera otras fuentes de biomasa. En la Tabla 1.6 se muestran otros ejemplos de aplicación de este tipo de estudios en el sector energético renovable.

**Tabla 1.6.** Proceso de Jerarquía Analítica en proyectos de planificación energética renovable.

<b>Proyecto</b>	<b>Técnica utilizada</b>	<b>Fuente</b>
Evaluación de emplazamientos de plantas de biomasa.	AHP utilizando un sistema de información geográfica ( <i>GIS environments</i> en inglés)	Perpiña et al. (2012)
Determinación de un índice de diversificación de las zonas de abasto cañero y de las fábricas de azúcar de México.	AHP	Aguilar-Rivera (2014)
Comparación de la generación de una central térmica de carbón y una planta de biomasa.	AHP para ponderar los criterios principales y WSM para la selección de alternativas	González (2017)
Selección de la mejor alternativa de conversión de residuos en energía (WTE en inglés) en Omán.	AHP	Qazi et al. (2018)
Evaluación de emplazamientos de granjas para el aprovechamiento de la energía solar en Irán.	GIS-AHP con lógica difusa	Mokarrama et al.(2020)
Evaluación de emplazamientos de granjas de energía renovable en Irán.	GIS-AHP con lógica difusa	Nadizadeh et al.(2021)
Evaluación de emplazamientos para el aprovechamiento de la energía hidráulica en Australia.	GIS-AHP	Ali et al.(2023)
Selección óptima del emplazamiento de una central solar en Irán.	AHP	Ahadi et al. (2023)

**Fuente:** (Elaboración propia).

Qazi et al (2018) en su estudio “análisis de decisión multicriterio para la selección de tecnologías en la gestión de desechos sólidos municipales” utilizaron el método AHP para evaluar diferentes alternativas para convertir dichos desechos en energía. Los criterios utilizados fueron económicos y medioambientales, no incluyendo el método emergético como complemento de las valoraciones que propone el autor. (Buitrago & Pinto, 2015) por su parte, realizan un estudio de la sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar producido en el Valle del Cauca, utilizando el Indicador Integrado de desarrollo sostenible S3 y Biograma desarrollado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA. Se obtuvo como principal resultado que la sostenibilidad actual del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar es inestable; siendo las dimensiones ambiental, social y económica en orden descendente las que contribuyeron en el resultado general de la sostenibilidad del sector en los periodos evaluados, dicha metodología no se enfoca específicamente en el aprovechamiento del bagazo ni en otros combustibles (RAC, marabú, etc). Además, a pesar de desarrollar un indicador integrado de desarrollo sostenible, no considera criterios desde el punto de vista emergético que contribuyan a evaluar la sostenibilidad desde esta perspectiva.

Machín-Armas y Fernández-Santiesteban (2015) proponen un modelo matemático de carácter matricial para la evaluación de la sostenibilidad. En su trabajo se expone un estudio sobre el problema de los biocombustibles que la Agroindustria Azucarera Cubana puede generar en la búsqueda de su sostenibilidad, para contribuir al logro de un modelo energético sostenible para el país, potenciado por fuentes nacionales seguras, perdurables y renovables; como lo es el caso de la bioenergía aportada por la caña de azúcar. Dicho modelo matemático prescinde de una evaluación emergética para poder caracterizar la sostenibilidad (González, 2017). Por su parte, mediante una metodología realiza un análisis de la sostenibilidad de la generación de energía eléctrica comparando la generación de una central térmica de carbón y una planta de biomasa, para obtener que ambas produzcan la misma cantidad de GWh al año, el método empleado fue el AHP. Dicha metodología no incluye el análisis del comportamiento de la biomasa desde los métodos energético, exergético y emergético para de una manera integrada evaluar su sostenibilidad. Por otra parte, Falcón Roque (2018) propone un modelo denominado SEPLAN (Sustainable Energy Planning por sus siglas en inglés), en el cual establece seis funciones como objetivo: sustituir la energía fósil por energías renovables, minimizar los costes, el acceso universal de la energía en las comunidades rurales aisladas y evitar las

emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>; para ello realiza la optimización independiente de cada función y obtiene un conjunto de soluciones eficientes a través de la aplicación de la técnica multicriterio. Sin embargo, este modelo no incluye un análisis emergético que permita mediante la obtención de indicadores poder considerarlo para la optimización propuesta.

Ruiz (2019) mediante el Concepto Integrado de Sostenibilidad (ICoS por sus siglas en inglés) desarrolla una metodología para aplicar un esquema de evaluación en proyectos de Bioenergía en Colombia. La metodología desarrollada incluye criterios e indicadores para la evaluación del desempeño de proyectos de bioenergía en: gestión de residuos, desempeño energético, equidad energética, cambio climático, entre otros. El esquema fue aplicado para evaluar el desempeño del relleno sanitario Guabal en el municipio de Yotoco ante tres escenarios: quema no controlada de metano, quema controlada del metano y generación de energía a partir del biogás, determinándose que el último escenario es el que permite tener mejor desempeño en la evaluación de la sostenibilidad.

### **1.5 Conclusiones parciales**

1. En la literatura consultada no se encontró para Cuba, una metodología para evaluar la sostenibilidad energética del aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera. Las metodologías utilizadas en la actualidad se limitan a considerar solamente una arista de esta problemática.
2. Se demostró que los métodos energéticos, exergéticos y emergéticos son utilizados por la literatura para evaluar sostenibilidad energética de la biomasa desde diferentes aristas con sus alcances y limitaciones, aunque no se encontraron reportes de la utilización de los mismo de manera integrada.
3. Quedó en evidencia a partir de la bibliografía consultada, las ventajas del método emergético sobre el exergético y energético para la valoración de la sostenibilidad al poder cuantificar la energía, lo que aporta un amplio diapason de indicadores ambientales, económicos y sociales que no lo aportan los otros métodos.
4. Se pone de manifiesto en este capítulo, que la aplicación de los métodos de decisión multicriterios son una de las herramientas utilizadas en la toma de decisiones en relación con las Fuentes Renovables de Energía, existiendo una diversidad de métodos dependiendo del área de aplicación.

**CAPÍTULO II. METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA  
EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL  
APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN LA  
INDUSTRIA AZUCARERA**

## **CAPÍTULO II. METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

### **2.1 Metodología multicriterial para la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos**

Para la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos en el aprovechamiento de la biomasa se han trabajado métodos de análisis fundamentalmente desde la perspectiva energética, exergética y emergética. Cada uno de estos métodos con sus alcances y limitaciones. En este capítulo se presenta la propuesta de una metodología que permite integrar estos métodos como solución y aporte de análisis de la sostenibilidad para diferentes biomasa a emplear como combustible en la industria azucarera. Para ello se comienza a partir de los métodos energético, exergético y mediante balances, la determinación de los rendimientos o eficiencias. Los indicadores obtenidos son utilizados para la jerarquización del nivel de importancia al emplearse el método emergético como herramienta de análisis ambiental, donde a partir de indicadores es posible obtener una visión global del proceso mediante la sostenibilidad de las alternativas consideradas.

La primera etapa parte de la selección de un sistema de asesoramiento de expertos encargado de identificar/modificar las opciones de aprovechamiento de la biomasa en energía 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 debe formarse sobre la base de los antecedentes en el conocimiento del problema. La siguiente etapa de la metodología enmarca la selección de los criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación mediante la aplicación del Método Delphi de evaluación de criterios. Con este método es posible realizar el cribado para seleccionar los criterios y/o subcriterios necesarios para alcanzar el objetivo de la investigación, en dependencia de las consideraciones de los tomadores de decisiones (comité de expertos). Una vez obtenidos los criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación se procede a la aplicación del método AHP para establecer el ranking de alternativas.

La metodología aporta criterios para la toma de decisiones dentro de la industria azucarera actual, permitiendo con la integración de los métodos una visión clara y robusta

de cuales pueden ser las mejores variantes de utilización de combustibles dentro del sector azucarero.

El alcance de esta está dado por la evaluación de la sostenibilidad basada en costes físicos de la biomasa principales o mezclas de estas a utilizarse como combustibles en el proceso de aprovechamiento de energía para las tecnologías instaladas dentro de los esquemas termoenergéticos actuales. Para ello la figura 2.1 presenta un diagrama heurístico que describe las tres etapas de desarrollo.

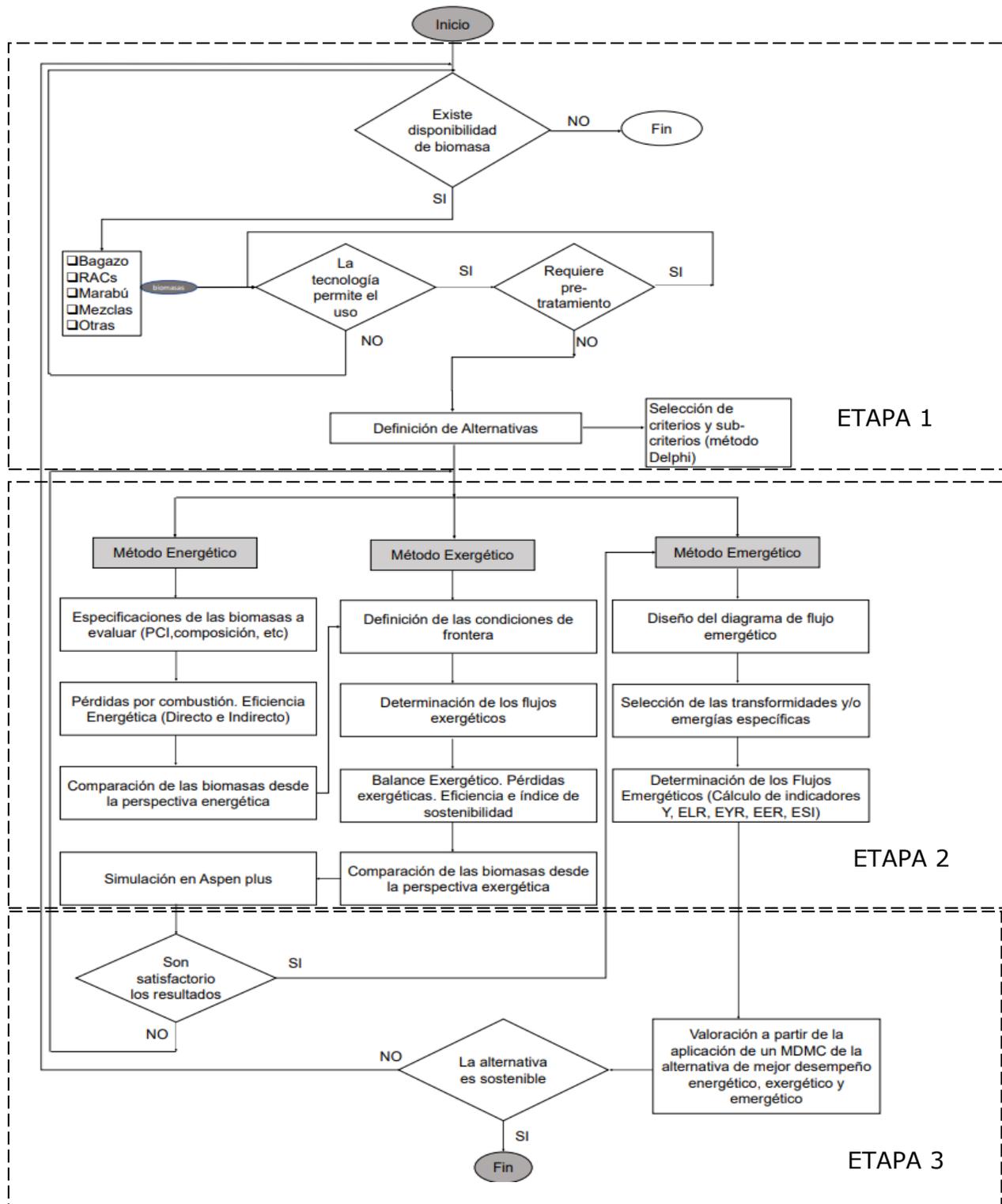


Figura 2.1. Diagrama heurístico de la metodología propuesta en el estudio. Fuente: (Elaboración propia)

El análisis se centra en la determinación de indicadores energéticos-exergéticos y emergéticos que permitan formar una base para la evaluación general. Las tecnologías seleccionadas como caso de estudio, para la cual fue considerado aplicar los balances propuestos son el G.V VU-40 de alta presión y el G.V tipo Retal. La primera fase incluye fundamentalmente la selección de la tecnología y de los combustibles (biomasa y mezclas de estas). A partir de la técnica de asesoramiento de expertos fueron consideradas las alternativas para la evaluación. La segunda fase consiste en proponer los tres métodos o balances a aplicar. El balance energético parte de analizar las características de los combustibles (composición, disponibilidad), etc. La determinación de las pérdidas en el generador de vapor, además de las eficiencias energéticas, tanto por el método directo como indirecto, fueron tomando como base el método propuesto por (Rubio-González, 2015). Para el desarrollo del método exergético fue definida, como condición de frontera el G.V, fueron determinados los flujos o corrientes exergéticas de entrada-salida para posteriormente determinar las pérdidas y eficiencia exergética. Todo esto fue simulado mediante la herramienta computacional Aspen Plus y comparándose los resultados con el método analítico y lo reportado en la literatura para condiciones similares de explotación. La realización del método emergético se realizó a partir de la elaboración del diagrama de flujo emergético y de las consideraciones de transformidades reportadas en la literatura y la calculada para el caso del marabú. A partir de esto, fueron calculados los indicadores emergéticos.

## **2.2 Etapa 1. Descripción del alcance, biomasa y mezclas a evaluar**

### **2.2.1 Descripción de las variantes de biomasa y mezclas evaluadas**

Las necesidades energéticas actuales, ante el agotamiento de los combustibles fósiles, el incremento del costo de estos, así como el aumento de la contaminación ambiental, requieren de alternativas que permitan hacer un uso eficiente de fuentes energéticas disponibles y aprovechables a partir de los desperdicios de las industrias, dentro de los que el bagazo, es líder (Abascal et al., 2023; Quiroz et al., 2016; Hernández et al., 2017). En Cuba, al terminar la zafra azucarera, queda un sobrante significativo de este residuo cañero, con excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas (Garcés Paz & Martínez Silva, 2019; Orozco & Giraud, 2022) , que puede ser debidamente almacenado para su posterior uso como portador energético o eléctrico (Solano et al., 2020; Flores et al., 2008; Rodríguez-Pérez et al., 2014; Rodríguez et al., 2010; Villar, 2010), así como

para la obtención de biocombustibles bajo el concepto de biorrefinerías (Zumalacárregui-De Cárdenas et al., 2015).

En Cuba, los RAC constituyen el 28 % de paja y cogollo de caña, los cuales son la biomasa más importante que se procesa y puede ser utilizada con fines energéticos, particularmente en tecnologías de baja presión (Muñoz, 2017; Ripoli et al., 1991; Mesa et al., 2008), como alimento animal o para producir otros derivados de la caña de azúcar (Mejías-Mejías-Brizuela et al., 2016; León-Martínez et al., 2013). El marabú, *Dichrostachys cinerea* (L.), está identificado en Cuba como una importante fuente de biomasa para la generación de electricidad (Reyes et al., 2018), para lo cual se demandan grandes cantidades, lo que obliga a la mecanización de su cosecha. Sus propiedades obtenidas bajo condiciones de mecanización no han sido estudiadas a profundidad. (Rubio-González et al., 2021; Cano-Estrella et al., 2022). El marabú existe en Cuba en grandes cantidades, se estiman 1,14 millones de ha con una densidad media de 37 t/ha (Hernández et al., 2017). Esto ha hecho que se identifique como un importante combustible complementario para las bioeléctricas.

En el caso de las mezclas de RAC y bagazo dependiendo de la disponibilidad de uno u otro en la literatura se reportaron varias mezclas (Rodríguez Arias et al., 2019; Golato et al., 2017; Khattak et al., 2018; Ameri et al., 2008; Guerra et al., 2020), fue considerada la mezcla 50 % Bagazo 50 % RAC como una muestra intermedia para posteriormente mediante el Aspen Plus poner simular esta y otras combinaciones.

En el caso de la mezcla bagazo-marabú, este último fue considerado disminuir al 10 %, en primer lugar, ya que la disponibilidad del marabú es más limitada y la ficha técnica de la tecnología donde se evalúa la mezcla, recomienda mínimo considerar un 10 % de esta biomasa (Ciro Redondo Biomass Power, 2022).

Por otro lado, no se justifica el empleo del marabú en tecnologías de bajos parámetros debido a particularidades propias de esta y características tecnológicas para su aprovechamiento.

La etapa 1 incluye primeramente la descripción de los combustibles empleados. Este estudio contempla la utilización del bagazo de caña, los RAC, marabú, y mezclas de esta biomasa. Las variantes de combustible y mezclas fueron establecidas como: variante V1 (100 % bagazo), variante V2 (100 % RAC), variante V3 (100 % Marabú); variante V4 (50 % Bagazo y 50 % RAC); variante V5 (90 % Bagazo y 10 % Marabú); variante V6 (90 %

RAC y 10 % Marabú), las mismas quedando agrupadas en la Tabla 2.1 <sup>1</sup>A continuación, se describe la composición elemental necesaria para el balance términoenergético.

**Tabla 2.1.** Distribución de las variantes a evaluar para los diferentes casos de estudio.

Variantes	G.V Retal	G.V VU-40
V1 (100 % bagazo)	Evaluada	Evaluada
V2 (100 % RAC)	Evaluada	No evaluada (demostrada corrosión)
V3 (100 % Marabú)	No evaluada (no adaptada para dicha biomasa)	Evaluada
V4 (50 % Bagazo y 50 % RAC)	Evaluada	No evaluada (ídem)
V5 (90 % Bagazo y 10 % Marabú)	No evaluada (ídem)	Evaluada

**Fuente:** (Elaboración propia).

### 2.2.1.1 Caracterización de los combustibles

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza, para su estudio y análisis es preciso conocer la composición química de los combustibles sólidos a utilizar. 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) (Rodríguez et al., 2000).

#### Bagazo, RAC y Marabú

El bagazo, los RAC y el marabú además del aprovechamiento desde el punto de vista energético, presentan posibilidades de incorporación y empleo en otros sectores. La composición elemental de la masa de trabajo para la biomasa consideradas en el estudio se muestra en la tabla 2.2:

---

<sup>1</sup> Serán consideradas para la evaluación en el G:V tipo Retal las variantes V1, V2, V4 respectivamente, mientras que las variantes V1, V3 y V5 serán consideradas para el G.V tipo VU-40, esto está dado por las particularidades de cada biomasa, para el G.V tipo VU-40 está demostrado que el empleo de los RACs es altamente corrosivo, mientras que el marabú no es evaluado en el G.V tipo Retal.

**Tabla 2.2:** Composición elemental de la masa de trabajo para el Bagazo, RAC y Marabú (%).

<b>Biomasa</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>W</b>
<b>Bagazo</b>	23,50	3,00	22,92	0,06	0,02	0,50	50
<b>RAC</b>	43,70	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95	15
<b>Marabú</b>	21,3	6,04	41,8	0,33	0,03	2,80	23

**Fuente:** (Rodríguez et al., 2000; Rubio González et al., 2019).

Las composiciones elementales de cada una de esta biomasa permiten la correcta caracterización energética-exergética dentro del proceso de aprovechamiento como fuente de energía. El bagazo presenta generalmente el mayor contenido de humedad de todas las demás, sin embargo, el marabú presenta un mayor contenido de azufre en comparación con los RAC y bagazo. La tabla 2.3 presenta la composición elemental de la masa de trabajo (%), de las mezclas a utilizar en el estudio.

**Tabla 2.3:** Composición elemental de la masa de trabajo (%), de las mezclas.

<b>Residuo</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>W</b>
<b>Bagazo-RAC</b>	45,90	5,80	43,20	0,30	0,10	4,90	32,50
<b>Bagazo-Marabú</b>	46,67	4,92	46,64	0,33	0,26	1,25	28,0

**Fuente:**(Rubio González et al., 2019).

Los resultados obtenidos son determinados a partir de la composición elemental de la biomasa descrita en el estudio. No obstante, existe una variación de los resultados aquí expuesto sobre todo en cuanto a porcentaje de humedad, cenizas y grado de pulverización de la biomasa, lo cual puede influir en los resultados obtenidos, aunque no en la aplicación de la metodología.

### **2.2.2 Descripción de las tecnologías de los estudios de casos**

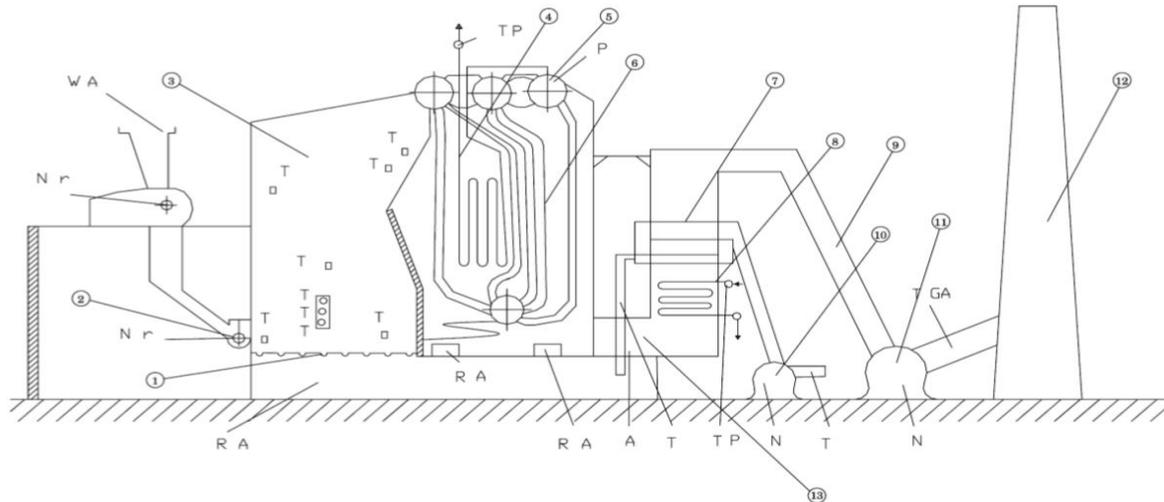
Como tecnologías de combustión fueron consideradas el G.V del tipo RETAL, ampliamente utilizado en la industria azucarera cubana, pudiendo encontrarse de 12,5

kg/s y de 16,7 kg/s, con presiones en el orden de 1,9 MPa. Las características técnicas y esquema típico de la instalación para esta tecnología son presentados en la Tabla 2.4 y Figura 2.2

**Tabla 2.4** Parámetros de trabajo de un G.V tipo Retal de 12,5 kg/s.

Presión	1.9 MPa
Temperatura	593,15 K
Producción de Vapor (Dv)	12,5 kg/s
Temperatura agua alimentar (Taa)	353,15 K
Consumo de combustible para el bagazo (Bc)	6,11 kg/s
Consumo de bagazo para 50%	3,05 kg/s
Consumo de RAC para 50%	1,71 kg/s
Coefficiente de exceso de aire a la salida de la caldera (alfa)	2
Coefficiente de exceso de aire a la salida del horno (alfa Ht)	1.8
Temperatura de salida de los gases (Tgs)	546,89 K

**Fuente:** (Elaboración propia).

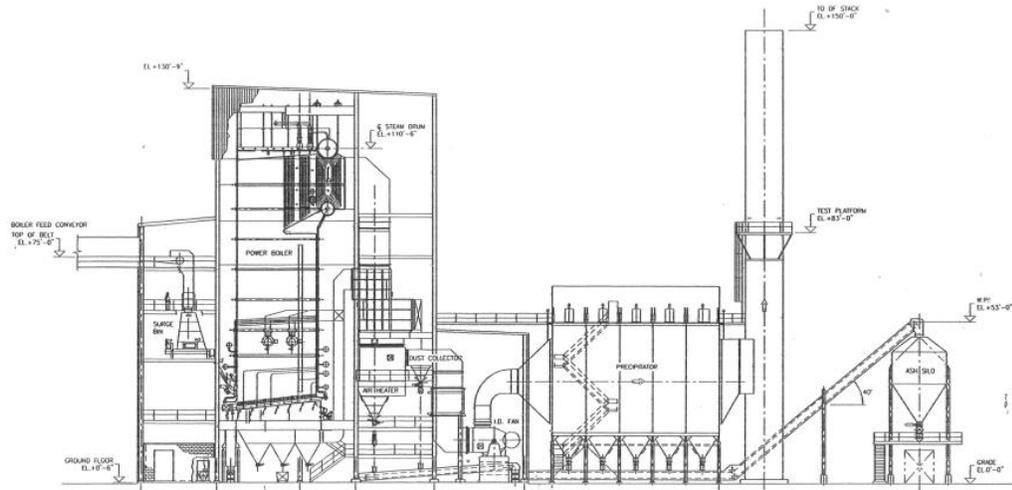


**Figura 2.2** .Esquema típico de un G.V tipo Retal. **Fuente:** (Rubio González et al., 2019).

Leyenda

(1: parrilla, 2: spreader-stoker, 3: horno, 4: sobrecalentador, 5: tambores o domos, 6: turbogeneradores, 7: calentador de aire, 8: economizador, 9: conducto de los gases de escape, 10: ventilador de suministro de aire, 11: ventilador de extracción de aire, 12: chimenea y 13 ducto de salida de los gases de escape. Dentro de los parámetros de medida tenemos: A: concentración de cenizas, GA: gases de escape del conducto, N: potencia del motor, P: presión, r: revoluciones por minuto, R: peso residual, T: temperatura y W: porcentaje de humedad del bagazo).

Además, se consideró el G.V de 65,28 kg/s de vapor, presión 8 MPa, 723,15 K. Las características técnicas para dicha tecnología se presentan en la tabla 2.5 (Anexo 21). La figura 2.3 presenta el esquema típico de este G.V de 65,28 kg/s de vapor (Vilches, 2022). Dicha biomasa será evaluada para estas dos tecnologías, consideradas como caso de estudio, donde la selección se corresponde debido a que el G.V tipo Retal prácticamente se encuentra instalado en la mayoría de las fábricas de azúcar del país y el G.V de altos parámetros es una tecnología recientemente instalada en una bioeléctrica.



**Figura 2.3** Esquema típico de un G.V de 65,28 kg/s, 8 MPa, 723,15 K de vapor. **Fuente:** (Vilches, 2022)

**Tabla 2.5** Parámetros de trabajo de un G.V de 65,28 kg/s, 8,0 MPa, 723,15 K de vapor.

Parámetros	Valor
Capacidad nominal	65,28 kg/s
Presión de diseño	8,0 MPa
Presión de operación	6,2 MPa
Temperatura del vapor	723,15 K
Temperatura del agua de alimentar	410,15 K
Aire ambiente	299,15 K

**Fuente:** (Vilches, 2022)

### 2.2.3 Método Delphi de evaluación de criterios

La siguiente etapa de la metodología enmarca la selección de los criterios y/o subcriterios mediante la aplicación del Método Delphi. Con este método se podrá realizar el cribado para seleccionar los criterios y/o subcriterios necesarios para alcanzar el objetivo de la investigación, en dependencia de las consideraciones de los tomadores de decisiones (comité de expertos).

#### 2.2.3.1 Selección del comité de expertos

Para la selección de los expertos se debe definir el nivel de competencia de los candidatos según la metodología elaborada por el Comité Estatal para la Ciencia y la Técnica de Rusia en el año 1971. Para ello se parte de elaborar una lista de candidatos que cumplan los requisitos predeterminados de experiencia, años de servicio, conocimientos sobre el tema, etc. La competencia se determina mediante un coeficiente K, que se calcula como la semisuma (ecuación 2.1) de un coeficiente ( $K_c$ ) que valora el nivel de conocimientos sobre el tema investigado y otro ( $K_a$ ) que establece una medida de las fuentes de información.

$$K = \frac{1}{2}(K_c + K_a) \quad (2.1)$$

Para estimar los coeficientes  $K_c$  y  $K_a$  se elabora una encuesta donde los candidatos realizan una autoevaluación como se muestra en el Anexo 1. Previo a esto cada candidato debe ser informado del contexto e importancia del estudio con el propósito de conseguir su compromiso. Una vez obtenidas las autoevaluaciones el coeficiente  $K_c$  se calcula como el promedio de los valores ( $V_c$ ) que los candidatos les confieren a los aspectos de la encuesta ( $n_c$ ) multiplicado por el factor 0,1 como se muestra en la ecuación 2.2.

$$K_c = 0,1 \sum_{i=1}^{n_c} \frac{v_{c_i}}{n_c} \quad (2.2)$$

Por su parte el coeficiente de argumentación ( $K_a$ ) se calcula como la sumatoria de los valores del grado de influencia de cada una de las fuentes de conocimiento de los candidatos ( $V_a$ ), tal como se muestra en la ecuación 2.3. Los valores por asignar en dependencia de la respuesta aparecen representados en la Tabla 2.6.

$$K_a = \sum_{i=1}^6 v_{a_i} \quad (2.3)$$

Debido a la escala utilizada se asegura que  $K \in (0,1]$ . Luego la competencia del candidato se estima en alta si  $K \geq 0,8$ , media si  $0,5 \leq K < 0,8$  y baja si  $K < 0,5$ .

**Tabla 2.6.** Escala para la determinación del coeficiente de argumentación.

Número	Fuente de Argumentación	Grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación		
		Alto	Medio	Bajo
1	Análisis realizados por usted	0,3	0,2	0,1
2	Experiencia adquirida	0,5	0,4	0,2
3	Trabajos de autores nacionales que conoce	0,05	0,05	0,05
4	Trabajos de autores internacionales que conoce	0,05	0,05	0,05
5	Conocimiento propio sobre el estado del tema	0,05	0,05	0,05
6	Su intuición	0,05	0,05	0,05

**Fuente:** (Elaboración propia).

Para la selección del número de expertos a participar en el proceso de decisión se utiliza la ecuación 2.4.

$$m = \frac{p(1-p)k}{i^2} \quad (2.4)$$

Donde  $m$  representa el número de expertos,  $p$  la proporción del error que se comete al hacer estimaciones del problema con la cantidad de expertos,  $i$  la precisión del experimento y  $k$  una constante que depende del nivel de significación estadística  $(1-\alpha)$ , la cual es obtenida a partir de la Tabla 2.7. Hay que destacar que  $p \in (0,1)$  y para lograr resultados confiables se recomienda que  $i \leq 0,12$ . Se seleccionarán entonces para el estudio los  $m$  expertos cuyos coeficientes  $K$  sean mayores, recomendándose que todos tengan una competencia alta.

**Tabla 2.7.** Coeficientes de significación estadística.

<b>1-<math>\alpha</math></b>	<b>k</b>
99%	6,6564
95%	3,8416
90%	2,6896

**Fuente:** (Elaboración propia).

### 2.2.3.2 Determinación de los criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación

Para el desarrollo de esta etapa inicialmente los expertos deben ser entrevistados para conocer en su opinión cuales son los criterios por considerar en la evaluación. Al igual que en otros estudios de este tipo debe garantizarse el anonimato para promover el pensamiento creativo, evitando tensiones y que ideas minoritarias sean sofocadas (Valdés, 2020). En esta fase es importante destacar que los criterios deben cumplir los requisitos expuestos en el Anexo 1. Puede suceder que algunos criterios sean obligatorios a tomar en cuenta en la evaluación como son los factores técnico-económicos, pero de igual manera en este proceso se pueden generar un elevado número de criterios que deben ser reducidos en caso necesario. Para esa selección y/o cribado de criterios se propone el empleo del método Delphi de evaluación de criterios descrito por Cortés (2011).

### 2.2.3.3 Método Delphi para la evaluación de criterios y/o subcriterios

El método Delphi es aplicado para evaluar criterios, sometidos a un grupo de  $m$  expertos, que dan categorías de evaluación a los criterios previamente seleccionados. En caso de que estos criterios no estén determinados previamente se puede utilizar la experiencia y conocimientos de los expertos para conformar los criterios a valorar. Dicho proceso consta de dos rondas fundamentalmente.

**Primera Ronda:** Se da a los expertos el objetivo que se pretende alcanzar y se les pide que den sus consideraciones sobre los criterios necesarios para alcanzar dicho objetivo. Se crea la tabla de frecuencias observadas con los criterios de cada experto, como se muestra en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Frecuencias observadas con los criterios de los expertos.

<b>Expertos</b>	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>.....</b>	<b>Criterio <math>n</math></b>
Experto 1		x		
Experto 2	x			x
.....				
Experto $m$	x	x		

**Fuente:** (Elaboración propia).

Donde  $m$  es el número de expertos y  $n$  el número de criterios dado por los expertos.

**Segunda Ronda:** Se reciben los resultados de los expertos y aquellos criterios que no representan a la mayoría de los expertos (menos del 20 % de los expertos) deberán ser valorados en una ronda adicional, solo para los mismos, para saber si se suben al 20 % o se quedan por debajo, en cuyo caso se eliminarán. En forma general esta ronda logra hacer la decantación de los criterios minoritarios, si hubiese problemas con esto entonces se debería hacer una ronda adicional para precisar bien los criterios eliminados.

Una vez listados los posibles criterios estos son evaluados por los expertos utilizando variables lingüísticas del tipo de escala de Liker (con  $k=5$  categorías de evaluación), tal y como se puede observar en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9.** Variables lingüísticas utilizadas para la evaluación de criterios.

Variable lingüística	Nomenclatura
Sin importancia	S
Poco importante	P
Moderadamente importante	M
Importante	I
Muy importante	MI

**Fuente:** (Elaboración propia).

Una vez realizadas las encuestas y evaluados los criterios por parte del panel de expertos, se procede a la construcción de la tabla de frecuencias observadas de los  $n$  criterios, tal y como se puede apreciar en la Tabla 2.10. Se plasma en la tabla la cantidad de expertos que seleccionó cada rango de evaluación.

**Tabla 2.10.** Frecuencia observada en la evaluación de los expertos para el cribado de criterios.

Criterio	Frecuencia observada				
	S	P	M	I	MI
Criterio 1	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{14}$	$T_{15}$
Criterio 2	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	$T_{24}$	$T_{25}$
Criterio $n$	$T_{n1}$	$T_{n2}$	$T_{n3}$	$T_{n4}$	$T_{n5}$

**Fuente:** (Elaboración propia).

Luego se procede a la conformación de la tabla de frecuencias acumuladas tal y como se observar en la Tabla 2.11.

**Tabla 2.11.** Frecuencia acumulada en la evaluación de los expertos para el cribado de criterios.

Criterio	Frecuencia acumulada				
	S	P	M	I	MI
Criterio 1	$T_{11}$	$\sum_{j=1}^2 T_{1j}$	$\sum_{j=1}^3 T_{1j}$	$\sum_{j=1}^4 T_{1j}$	$\sum_{j=1}^5 T_{1j}$
Criterio 2	$T_{21}$	$\sum_{j=1}^2 T_{2j}$	$\sum_{j=1}^3 T_{2j}$	$\sum_{j=1}^4 T_{2j}$	$\sum_{j=1}^5 T_{2j}$
.....					
Criterio $n$	$T_{n1}$	$\sum_{j=1}^2 T_{nj}$	$\sum_{j=1}^3 T_{nj}$	$\sum_{j=1}^4 T_{nj}$	$\sum_{j=1}^5 T_{nj}$

**Fuente:** (Elaboración propia).

Para obtener la tabla de frecuencias acumulada relativas (Ver Tabla 2.12) se divide el valor de cada frecuencia acumulativa por la cantidad de expertos. El último rango de valoración debe eliminarse pues sólo se buscan  $k-1$  puntos de corte.

**Tabla 2.12.** Frecuencia acumulada relativa en la evaluación de los expertos para el cribado de criterios.

Criterio	Frecuencia relativa acumulada			
	S	P	M	I
Criterio 1	Dividir cada elemento de la tabla anterior entre el número $m$ de expertos $[\sum T_{ik-1}/m]$			
Criterio 2				
.....				
Criterio $n$				

**Fuente:** (Elaboración propia).

Posteriormente se procede a la obtención del valor de la imagen que corresponde a cada frecuencia acumulativa relativa, a partir de la tabla de la distribución normal. Para ello se busca en cada casilla de la anterior el valor  $Z_i$  correspondiente a la distribución normal, obteniéndose la tabla 2.13.

**Tabla 2.13.** Distribución normal de la evaluación de los expertos para el cribado de criterios.

Criterio	Distribución Normal Inversa correspondiente a cada Frecuencia Acumulativa Relativa				Suma (S)	Promedio (P)	N	N-P <sub>r</sub>
	S	P	M	I				
Criterio 1	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>	S <sub>1</sub>	P <sub>r1</sub>		N-P <sub>r1</sub>
Criterio 2	Z <sub>21</sub>	Z <sub>22</sub>	Z <sub>23</sub>	Z <sub>24</sub>	S <sub>2</sub>	P <sub>r2</sub>		N-P <sub>r2</sub>
.....								
Criterio n	Z <sub>n1</sub>	Z <sub>n2</sub>	Z <sub>n3</sub>	Z <sub>n4</sub>	S <sub>n</sub>	P <sub>m</sub>		N-P <sub>m</sub>
<b>Puntos de corte (PC)</b>	<b>PC<sub>1</sub></b>	<b>PC<sub>2</sub></b>	<b>PC<sub>3</sub></b>	<b>PC<sub>4</sub></b>				

**Fuente:** (Elaboración propia).

Donde:

$$S_n = \sum Z_{nj} \quad 2.5$$

$$P_{rn} = \frac{\sum Z_{nj}}{(k-1)} \quad 2.6$$

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k-1} Z_{nj}}{n \cdot k} \quad 2.7$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{ik-1}}{n} \quad 2.8$$

De la Tabla 2.13 se obtienen los valores N-P<sub>r</sub> de cada criterio que definen a que rango de evaluación pertenecen. Por su parte, los puntos de corte son utilizados para determinar la categoría o grado de adecuación de cada etapa del proceso según la opinión de los expertos. La ubicación de los valores N-P<sub>r</sub> de cada criterio en el rayo numérico de los puntos de corte, demuestra la importancia que le otorgan los expertos a cada uno de los criterios evaluados.

Para el desarrollo de esta investigación en específico serán considerados los criterios que presenten una evaluación de Importante y Muy Importante por parte de los expertos. En la práctica, el umbral establecido para la selección de los criterios es definido en dependencia de la rigurosidad de la investigación. Una consideración de mayor o menor influencia se comporta inversamente proporcional la cantidad de criterios que superen el cribado.

Una vez obtenidas las proposiciones finales de los expertos en relación con la evaluación realizada, se hace necesario analizar el grado o nivel de acuerdo que existe entre los expertos, con el fin de otorgar mayor autenticidad al estudio. Para ello, se comprueba el grado de coincidencia de las valoraciones realizadas por los expertos utilizando el Coeficiente de Concordancia de Kendall, el cual constituye un estadígrafo muy utilizado en estudios de confiabilidad entre expertos de una materia, al determinar la asociación entre distintas variables. Dicho coeficiente es una medida de coincidencia entre ordenaciones que pueden ser objetos o individuos. En este caso el coeficiente concordancia ( $W$ ) será un índice de la divergencia del acuerdo efectivo entre los expertos mostrado en los datos del máximo acuerdo posible (perfecto).

Para la aplicación del Coeficiente de Concordancia de Kendall ( $W$ ), se construye una tabla de criterios evaluados/expertos (Ver Tabla 2.14) donde se asientan los rangos de valoración (en términos numéricos, 1 a 5) asignados a cada criterio evaluado por cada uno de los expertos.

**Tabla 2.14.** Rangos de valoración en términos numéricos de la evaluación de los expertos.

	Experto				
Criterio	1	2	3	.....	$m$
Criterio 1	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$		$X_{1m}$
Criterio 2	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$		$X_{2m}$
.....					
Criterio $n$	$X_{n1}$	$X_{n2}$	$X_{n3}$		$X_{nm}$

**Fuente:** (Elaboración propia).

Donde  $X_{nm}$  es el nivel de importancia o rango de valoración (expresado en términos numéricos) conferido al criterio  $n$  por el experto  $m$ .  $X_{nm} \in \mathbb{N}: [1,5]$ .

Una vez confeccionada la Tabla 2.21 se procede a determinar la suma de los valores numéricos ( $R_n$ ) asignados a cada criterio evaluado según la apreciación de los expertos, tal y como se presenta en la ecuación 2.9.

$$R_n = \sum_{i=1}^m X_{nm} \quad 2.9$$

Luego se calcula el valor medio de  $R_n$  dada por la sumatoria de los  $R_n$  entre el total de criterios evaluados ( $n$ ), como se puede apreciar en la ecuación 2.10.

$$Media = \frac{\sum R_n}{n} \quad 2.10$$

Se calcula la desviación media, dada por la diferencia entre cada  $R_n$  y el valor de la media según la ecuación 2.11.

$$Desviación Media = R_n - \frac{\sum R_n}{n} \quad 2.11$$

Se calcula la suma de los cuadrados de las desviaciones medias ( $S$ ) según la expresión 2.12.

$$S = \sum (R_n - \frac{\sum R_n}{n})^2 \quad 2.12$$

Por último, se calcula  $W$  a través de la expresión del coeficiente de concordancia de Kendall como se presenta en la ecuación 2.13.

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)} \quad 2.13$$

En esta prueba estadística el coeficiente  $W$  ofrece el valor que posibilita decidir el nivel de concordancia entre los expertos. El valor de  $W$  siempre oscila entre 0 y 1. El valor de 1 significa una concordancia de acuerdos total y el valor de 0 un desacuerdo total. Valores superiores a 0,5 son aceptados en este tipo de estudios (Cortés, 2011).

### 2.3 Etapa 2. Descripción de los métodos energético, exergético y emergético

La eficiencia energética según la literatura tiene principalmente dos métodos para calcularla; el método directo y el indirecto, este último tiene en cuenta una mayor cantidad de pérdidas en la combustión (Rubio-González, 2015). A continuación, se mostrará el procedimiento para determinar ambos métodos.

#### *Método directo*

Este método relaciona el calor utilizado la entalpía del vapor sobrecalentado  $I_{v,s}$  y el calor disponible entregado durante la combustión de la masa de trabajo del combustible o poder calórico inferior  $Q_i^t$ , como se muestra ecuación 2.14:

$$\eta_t = \frac{Dv(I_{v,s} - I_{aa})}{Q_i^t * B_c} * 100 \quad (2.14)$$

El  $Q_i^t$  se determina por las ecuaciones 2.15 y 2.16 dependiendo del sistema de unidad

$$Q_i^t = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 24 * W^t \quad (kJ/kg) \quad (2.15)$$

$$Q_i^t = 80,9 * C^t + 246 * H^t - 26 * (O^t - S^t) - 5,7 * W^t \quad (kcal/kg) \quad (2.16)$$

#### Método indirecto

El cálculo de la eficiencia por el método de balance indirecto  $\eta_T$  se obtiene partiendo de la ecuación 2.17:

$$\eta_T = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) [\%] \quad (2.17)$$

El error entre el método de balance 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 estas.

#### 2.4.1 Cálculos de las pérdidas por combustión

##### Pérdidas térmicas por los gases de salida ( $q_2$ )

El calor que se pierde a través de la masa de gases que salen de la caldera representan la mayor pérdida del sistema y su valor relativo se determina como:

$$q_2 = \frac{(I_{gsal} - \alpha_{gsal} I_{af}^0)(100 - q_4)}{Q_d^t} [\%] \quad (2.18)$$

El calor disponible de la masa de trabajo  $Q_d^t$  no es más que el poder calórico inferior de la misma, que depende únicamente de la composición del combustible como lo demuestran las ecuaciones 2.15 y 2.16.

La entalpía de salida de los gases se determina por la ecuación 2.19:

$$I_{gs} = I_g^0 + I_{exc}^a + I_{\Delta V_{H_2O}} + I_{cen} \quad (kJ/kg) \quad (2.19)$$

La entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión se calcula por la ecuación 2.20:

$$I_g^0 = V_{RO_2} * (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 * (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (kJ/kg) \quad (2.20)$$

Para determinar las entalpías específicas anteriores es necesario determinar la temperatura de los gases de escape ( $T_{ge}$ ) mediante la ecuación 2.21.

$$T_{gs} = 172,32 + 24,76 * \alpha_H + \frac{43,22}{\sqrt{D_v}} - 0,213 * D_v \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.21)$$

Los valores de  $V_{RO_2}$ ;  $V_{N_2}^o$  y  $V_{H_2O}^o$  son obtenidos por las ecuaciones 2.22, 2.23 y 2.24:

$$V_{RO_2} = 1,866 * \frac{(C^t + 0,375 * S^t)}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad (2.22)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 * V_a^o + 0,8 * \frac{N^t}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad (2.23)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 * H^t + 0,0124 * W^t + 0,025 * V_a^o \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad (2.24)$$

La entalpía del aire en exceso responde a la ecuación 2.25:

$$I_{exc}^a = (\alpha_c - 1)I_a^o \quad (2.25)$$

$$I_a^o = V_a^o (c\vartheta)_a \quad (2.26)$$

La entalpía del volumen de vapor de agua en exceso se determina por la ecuación 2.27:

$$I_{\Delta V_{H_2O}} = 0,016(\alpha_c - 1) * V_a^o * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.27)$$

A su vez  $V_a^o$  depende de la composición del combustible y se calcula por la ecuación 2.28:

$$V_a^o = 0,0889(C^t + 0,375 * S^t) + 0,265 * H^t - 0,0333 * O^t \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad (2.28)$$

Luego la entalpía de la ceniza se calcula a partir de la ecuación 2.29:

$$I_{cen} = (c\vartheta)_{cen} * \frac{A^t}{100} * a_{arr} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.29)$$

pero solo se tiene en cuenta para aquellos combustibles con un alto contenido de ceniza lo cual según (Rodríguez, 2000), puede verificarse a través de la siguiente relación:

$A^E < 0,95$  , y se obtiene por:

$$A^E = \frac{A^t}{Q_i^t} \quad (\% \text{ kg/MJ}) \quad (2.30)$$

Por último, la entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 303,15 K se obtiene por la ecuación 2.31:

$$I_{af}^o = 39,8 * V_a^o \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.31)$$

#### *Pérdidas de calor por incombustión mecánica ( $q_4$ )*

Estas pérdidas dependen de la composición del combustible, de la cantidad de sustancias volátiles, del contenido de cenizas, de la preparación que tenga el combustible y del método empleado para quemarlo.

Para la determinación de la pérdida por incombustión mecánica se utilizan varios métodos, de los cuales solo se mencionan los dos más comunes:

1. Método directo.
2. Balance de ceniza en el combustible.

Para calcular  $q_4$  por el método directo se necesita pesar la escoria  $G_{esc}$  que sale del horno, la ceniza que cae al foso  $G_f$  y la que es arrastrada por los gases  $G_{arr}$ . Esta última está compuesta por la ceniza que cae en los conductos y cajas de gases  $G_{arr}^c$  y por la que pasa a la chimenea  $G_{arr}^{ch}$  y se determina por la ecuación 2.32.

$$G_{arr} = G_{arr}^c + G_{arr}^{ch} \quad (2.32)$$

En el método directo también es necesario determinar a través del análisis de las muestras, el contenido de sustancias combustibles en la escoria  $C_{esc}$ , en el foso  $C_f$  y en los arrastres  $C_{arr}^c$ ,  $C_{arr}^{ch}$ .

Con los datos antes descritos y conociendo el consumo horario de combustible, puede calcularse el valor de  $q_4$  partiendo de las ecuaciones 2.33, 2.34, 2.35 y 2.36, para finalmente despejar en la Ec 2.36 como se muestra a continuación:

$$q_4^{esc} = \frac{G_{esc} C_{esc} 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad (2.33)$$

$$q_4^f = \frac{G_f C_f 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad (2.34)$$

$$(q_4^{arr})^c = \frac{G_{arr}^c C_{arr}^c 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad (2.35)$$

$$(q_4^{arr})^{ch} = \frac{G_{arr}^{ch} C_{arr}^{ch} 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad (2.36)$$

$$q_4 = q_4^{esc} + q_4^f + (q_4^{arr})^c + (q_4^{arr})^{ch} [\%] \quad (2.37)$$

El valor de  $G_{arr}^c$  se determina pesando la ceniza de los conductos de gases y embudos de la instalación. La magnitud  $G_{arr}^{ch}$  se determina con la ayuda de sondas especiales para captar las partículas.

Para determinar  $q_4$  por el segundo método se necesita conocer, al igual que en el método anterior, los valores de  $G_{esc}$ ,  $G_f$ ,  $C_{esc}$ ,  $C_f$  y  $C_{arr}$ ; además conocer el porcentaje de la ceniza en la escoria  $A_{esc}$ , en el foso  $A_f$ , y en los arrastres  $A_{arr}$ .

En este caso  $G_{arr}$  se determina por balance.

La cantidad de ceniza del combustible que se introduce en el horno es igual a 100% como se muestra en la ecuación 2.38:

$$a_{esc} + a_f + a_{arr} = 100 \% \quad (2.38)$$

Los valores de  $a_{esc}$ ,  $a_f$  y  $a_{arr}$  se determinan por las expresiones 2.39 y 2.40:

$$a_{esc} = \frac{A_{esc}G_{esc}}{A^tB_c} * 100 [\%] \quad (2.39)$$

$$a_f = \frac{A_fG_f}{A^tB_c} * 100 [\%] \quad (2.40)$$

Luego  $a_{arr}$  se obtiene despejando en la ecuación 2.38:

Como se explicó con anterioridad, de la ceniza que sale del horno una parte cae sobre los conductos de gases y la otra va a la chimenea ( $G_{arr}^c + G_{arr}^{ch}$ ). La determinación de  $G_{arr}$  se realiza por la expresión 2.41:

$$G_{arr} = \left( \frac{A^tB_c}{A_{arr}100} \right) a_{arr} [\%] \quad (2.41)$$

Luego como en el método anterior  $q_4$  se determina por las ecuaciones 2.33, 2.34, 2.35 y 2.36.

#### *Pérdidas de calor por incombustión química ( $q_3$ )*

Las pérdidas por incombustión química se evidencian a partir de la presencia de gases combustibles en los productos de la combustión, tales como: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>.

En la práctica, estas pérdidas se calculan en unidades relativas y se designan generalmente por  $q_3$  y se determinan por la ecuación 2.42.

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_d^t} * 100 = \frac{Q_3}{Q_i^t} * 100 [\%] \quad (2.42)$$

La cantidad de calor  $Q_3$ , que se pierde producto de la incombustión química, puede ser expresada de la forma siguiente:

$$Q_3 = V_{CO}Q_{CO} + V_{H_2}Q_{H_2} + V_{CH_2}Q_{CH_2} + V_{C_mH_n}Q_{C_mH_n} \quad (2.43)$$

La expresión 2.44 es más amplia, y se utiliza para combustibles sólidos y líquidos con alto contenido de azufre:

$$Q_3 = \frac{(C^t + 0,375S^t)(0,236CO + 0,202H_2 + 0,668CH_4)}{1000(CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \quad (2.44)$$

#### *Pérdidas de calor por enfriamiento exterior ( $q_5$ )*

Esta pérdida está determinada por el aislamiento térmico de las calderas y sus elementos. El valor de esta pérdida, para cálculos aproximados, puede ser obtenido por la ecuación 2.45:

$$q_5 = q_5^{\text{nom}} \left( \frac{D_v}{D} \right) [\%] \quad (2.45)$$

La tabla 2.15 presenta la pérdida por enfriamiento exterior para calderas de vapor, la misma está en función de su capacidad nominal.

**Tabla 2.15.** Pérdida por enfriamiento exterior para calderas de vapor.

Capacidad nominal de la Caldera		Pérdida de calor $q_5^{\text{nom}}$
kg/s	t/h	%
0,56	2	3,8
1,11	4	2,9
1,67	6	2,4
2,22	8	2,0
2,78	10	1,7
4,17	15	1,5
5,56	20	1,3
8,33	30	1,2
11,11	40	1,0
16,67	60	0,9
22,22	80	0,8
27,78	100	0,7
55,56	200	0,6

**Fuente:** (Rubio-González, 2015)

*Pérdida por el calor físico de la escoria ( $q_6$ )*

La escoria que se extrae del interior de los hornos sale a una alta temperatura, lo cual trae consigo pérdidas de calor. El cálculo de esta pérdida relativa puede ser realizado por la ecuación 2.46:

$$q_6 = \frac{a_{\text{esc}}(ct)_{\text{esc}}A^t}{Q_d^t} [\%] \quad (2.46)$$

Una vez determinadas todas estas pérdidas, se despejan en la ecuación 2.17 y se determina la eficiencia por el método indirecto.

## 2.4 Método exergético

El objetivo del análisis exergético dentro de un balance de exergía es evaluar la eficiencia exergética, la misma definida como la relación entre la exergía utilizada en el producto o proceso y la exergía suministrada al proceso.

$$\eta_{\text{exergética}} = \frac{\sum E_{\text{salida}}}{\sum E_{\text{entrada}}} \quad (2.47)$$

El balance exergético de un material depende de los siguientes componentes exergéticos: exergía cinética, potencial, física y química; y está escrito de la siguiente manera:

$$ex = exk + exp + expH + exch$$

El valor de la energía cinética y potencial de un flujo coincide con el valor de su exergía cinética y potencial, respectivamente (Ec 2.47 y Ec 2.48). La exergía química de las sustancias está tabulada (Song, Shen, y Xiao, 2011; Jan Szargut, 2011) y se calculan de la siguiente manera:

$$exc = m * C_0^2 / 2 \quad (2.47)$$

$$exp = m * g_e * Z_0 \quad (2.48)$$

Donde  $m$  es la masa del flujo,  $C_0$  es la velocidad del fluido en relación con la superficie de la tierra,  $Z_0$  es la altura del fluido sobre el nivel del mar y  $g_e$  es la aceleración de la gravedad (considerada constante).

La exergía física (Ec. 2.49) se define por el trabajo total máximo que se obtiene cuando el material se vuelve reversible desde su estado inicial de presión  $P_i$  y temperatura  $T_i$  hasta el estado en equilibrio con el ambiente o hasta  $T_0$  y  $P_0$  por el proceso físico, sin cambios en su composición química. Está definido por la siguiente ecuación:

$$exf = (h_i - h_0) - T_0 * (S_i - S_0) \quad (2.49)$$

Los términos  $h_i - h_0$  y  $s_i - s_0$  son los cambios de entalpia y entropía, por mol de materia, entre  $P_0$ ,  $T_0$  y  $P_i$ ,  $T_i$ , evaluados bajo la restricción de la composición de la mezcla.

Para la determinación de la exergía química de los hidrocarburos líquidos existe un método de cálculo, que utiliza un coeficiente  $\beta$ , esto depende de la composición química del compuesto, en este caso el fuel oil y sus componentes hidrógeno y carbono. Este método del factor  $\beta$ , obtiene esta exergía multiplicando el poder calorífico inferior y el factor  $\beta$ . Este factor depende de la composición atómica de la sustancia, que para el caso del combustible viene dada por los valores de hidrógeno y carbono, representado en la ecuación 2.50 (Dincer y Rosen, 2013).

$$ex_{ifuel}^0 = \beta(PCI)_{fuel} \quad (2.50)$$

Donde:

$$\beta = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \quad (2.51)$$

El factor  $\beta$  depende de la composición elemental del combustible y sus condiciones físicas de acuerdo con Szargut (1999) y se determina mediante la ecuación 2.52.

$$\beta = 1,0401 + 0,01728 * \frac{Z_{H2}}{Z_C} + 0,0432 * \frac{Z_{O2}}{Z_C} + 0,5904 * \frac{Z_S}{Z_C} * \left(1 - 2,0628 * \frac{Z_{H2}}{Z_C}\right) \quad (2.52)$$

Esta fórmula se usa siempre  $\left(\frac{0}{C}\right) = \leq 1$

#### 2.4.1 Índice de sostenibilidad exergética

Este se determina por la ecuación 2.53 (Balta et al., 2010; Inoussah et al., 2017)

$$IS = 1/DP \quad (2.53)$$

Donde:

$$DP = Ex_d/Ex_{in} \quad (2.54)$$

DP- Factor de agotamiento (Connelly & Koshland 1997), Ex<sub>d</sub>-Exergía perdida y Ex<sub>in</sub>-Exergía de entrada

Para realizar este balance exergético se consideran los flujos de entrada y salida del sistema con el fin de determinar la eficiencia exergética o disponibilidad para conocer cuánto vapor generado es aprovechado.

Primeramente, se determina la exergía del agua suministrada mediante la ecuación 2.55.

$$e_{aa} = (h_{aa} - h_o) - T_o(s_{aa} - s_o) \quad (2.55)$$

Luego se determina la exergía del agua de alimentar, se puede calcular a partir de la ecuación 2.56.

$$E_{aa} = m_{H_2O} * e_{aa} \quad (2.56)$$

Posteriormente se pasa a determinar la exergía del combustible utilizando la ecuación 2.57.

$$E_{Combustión} = m_{Comb} * Q_d \quad (2.57)$$

Mediante la ecuación 2.58 se determina la exergía del combustible.

$$E_{combustible} = h_{comb} * m_{Comb} \quad (2.58)$$

Luego utilizando las ecuaciones 2.59 y 2.60 se determina la exergía específica de los gases de escape y el flujo exergético de los gases de escape respectivamente.

$$m_{ge} = V_{ge} * \rho_{ge} * m_{Comb} \quad (2.59)$$

$$E_{ge} = m_{ge} * C_p (T_{ge} - T_o) \quad (2.60)$$

Luego se determina la exergía específica del vapor saturado y la exergía del vapor producido por la caldera mediante las ecuaciones 2.61 y 2.62 respectivamente.

$$e_{vs} = (i_{vs} - i_o) - T_o (s_{vs} - s_o) \quad (2.61)$$

$$E_{vs} = m_{vapor} * e_{vs} \quad (2.62)$$

Para determinar la pérdida de exergía en el generador de vapor durante el proceso de la combustión se utiliza la ecuación 2.63.

$$E_v^{cal} = (E_{aa} + E_{combustión} + E_{Combustible}) - (E_{vs} + E_{ge}) \quad (2.64)$$

Finalmente, el rendimiento exergético del generador de vapor se determina por la ecuación 2.65.

$$\eta_{exerg}^{gv} = \frac{E_{sal}}{E_{ent}} \quad (2.65)$$

## 2.5 Método emergético

La modelación energética incluye la definición de los límites espacio temporales del sistema, la modelación emergética propiamente y la determinación de los indicadores fundamentales a partir de transformidades establecidas y/o calculadas (Naredo, 1994; Sánchez et al., 2006).

### *Límites espacio-temporal del sistema*

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

### *Modelación emergética*

Este paso consiste en la representación por medio de diagramas de flujos de materia y energía utilizando la simbología emergética, con el fin de representar la interacción entre las fuentes internas y externas del sistema, además de los flujos de salida y retroalimentación del sistema.

La principal función de este paso es la organización de los datos, permitiendo determinar los flujos e interacciones en el sistema, destacando los más relevantes. La escala y grado de detalle pueden variar dependiendo de los objetivos y del tipo de socio ecosistema (Lomas Huertas, 2009).

El modelado se compone de los siguientes pasos (Lomas Huertas, 2009)

1. A partir de los límites del sistema se definen las principales entradas y salidas de energía del mismo, y se clasifican según su naturaleza (biogeofísica, económica, humana, etc.), de izquierda a derecha en orden de transformidad creciente alrededor del símbolo de límites del sistema.
2. Se definen los componentes internos del sistema y sus relaciones tanto con las entradas y salidas de materia y energía como entre ellos, teniendo cuidado de implicar todos los elementos del sistema que regulan los procesos que constituyen el funcionamiento de este. Se colocan bajo el mismo criterio que en el anterior punto.
3. Se incluyen los flujos de dinero correspondiente al uso económico que puedan tener algunos flujos del sistema, tales como, las entradas de dinero que mueven algunos de los componentes socio-económicos del mismo.
4. Se incluye la degradación correspondiente a la segunda ley de la termodinámica.
5. Se simplifica el diagrama según los objetivos del estudio mediante una agregación de categorías al nivel de detalle que se quiera llevar a cabo.

#### *Construcción de tablas emergéticas*

Partiendo del balance energético-exergético se procede a la construcción de la tabla emergética. Como se muestra en la tabla 2.16 esta presenta el orden de cada uno de los flujos y su origen en la primera columna. Luego la segunda muestra el nombre de dichos flujos, la tercera el valor proporcionado por los cálculos de cada flujo, en la cuarta columna figuran sus unidades correspondientes. La quinta columna se refiere a la emergía por unidad (transformidad 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 2.16** Ejemplo típico de una tabla emergética.

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)
1	Item 1	Item 1	J/año	Item 1	Em <sub>1</sub>
2	Item 2	Item 2	g/año	Item 2	Em <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
n.	Item n	Item n	J/año	Item n	Em <sub>n</sub>
Y	Y-ésimo Producto	Y-ésimo Dato	J o g/año	$\sum_n \frac{E_{mi}}{\text{Item}}$	$\sum_n E_{mi}$

**Fuente:**(Lomas Huertas, 2009).

*Dónde:*

- La columna 1 “nota” se refiere al orden en que están colocados cada uno de los flujos, y la nota a pie de tabla en la que se refiere el origen del dato, y los cálculos realizados para la transformación del mismo a las unidades correspondientes.
- La columna 2 es el nombre del “item” o flujo que se evalúa, y que figura, con la simbología correspondiente, en el diagrama de flujos.
- La columna 3 se refiere a la cifra proporcionada por los cálculos elaborados para cada flujo, que figuran numerados en una nota al pie de la tabla, en sus unidades correspondientes, que se encuentran en la Columna 4.
- La columna 5 se refiere a la emergía por unidad o factor de equivalencia (transformidad o emergía específica).
- La columna 6 es la que contiene la emergía, en los equivalentes solares emergéticos (sej) y es el resultado de multiplicar la columna 3 por la 5.

Las ecuaciones 2.66-2.71 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, que a su vez comprenden los adquiridos de la economía (F).

$$R = \sum_{i=1}^n \text{Recursos renovables} \quad (2.66)$$

$$N = \sum_{i=1}^n \text{Recursos no renovables} \quad (2.67)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Materiales de la economía} \quad (2.68)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \text{Servicios de la economía} \quad (2.69)$$

$$I = R + N \quad (2.70)$$

$$F = M + S \quad (2.71)$$

$$Y = I + F \quad (2.72)$$

El aire atmosférico tiene una composición volumétrica de 20,99 % de oxígeno, 78,03 % de nitrógeno, poco menos de 1 % de argón y pequeñas cantidades de varios gases inertes, como vapor de agua, dióxido de carbono, helio, hidrógeno y argón. Para cálculos de ingeniería es por lo general suficientemente exacto, incluir todos los gases inertes en el nitrógeno y usar en el análisis 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Así pues, en 100 kmoles de aire hay aproximadamente 21 kmoles de O<sub>2</sub> y 79 kmoles de N<sub>2</sub>, o sea la relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire es 3,76 kmol N<sub>2</sub>/ kmol O<sub>2</sub>. La composición gravimétrica del aire es 23,1 % de O<sub>2</sub>, 76,9 % N<sub>2</sub>, en peso, o sea que hay 3,32 kg N<sub>2</sub>/kg O<sub>2</sub>.

De acuerdo con lo expresado anteriormente, este flujo se separó considerando que parte del aire puede ser asumido como un recurso renovable (R) y parte como un recurso no renovable (N), en este estudio se estimó que el 23,1 % de la masa de aire interviene en la combustión, puesto que no se analizan los gases de la combustión. Por tanto, la fracción de aire no renovable queda:

$$F_{\text{aireN}} = \frac{0,231 * \text{Bagazo quemado}}{\alpha_H * \text{Bagazo quemado}} \quad (2.73)$$

Luego puede ser determinado el flujo de aire en (J/año) utilizando la ecuación 2.74 y mediante las ecuaciones 2.75 y 2.76 se determina la parte renovable y no renovable respectivamente.

$$V_a \left( \frac{J}{\text{año}} \right) = \left[ V_a \left( \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) * C_p * T_o \right] * \frac{1000J}{\text{kg}} \quad (2.74)$$

$$V_{aR} \left( \frac{J}{\text{año}} \right) = 0,799 * V_a \left( \frac{J}{\text{año}} \right) \quad (2.75)$$

$$V_{aN} \left( \frac{J}{\text{año}} \right) = 0,201 * V_a \left( \frac{J}{\text{año}} \right) \quad (2.76)$$

Para el cálculo del flujo de agua en kg/año se utiliza la expresión 2.77.

$$m_{H_2O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = m_{H_2O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} \quad (2.77)$$

Una persona consume 10 460 kJ de energía metabolizada/día y considerando 8 horas de trabajo la estimación de la labor humana se puede determinar a partir de la ecuación 2.78.

$$sti \quad (2.78)$$

Los flujos de costos del agua y del combustible a utilizar se determina a partir de las ecuaciones 2.79 y 2.80

$$m_{H_2O} \left( \frac{\$}{\text{año}} \right) = m_{H_2O} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} * P_{\text{agua}} \left( \frac{\$}{\text{m}^3} \right) * \frac{1\text{g}}{1000\text{kg}} \quad (2.79)$$

$$m_{\text{comb}} \left( \frac{\$}{\text{año}} \right) = m_{\text{comb}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} * P_{\text{comb}} \left( \frac{\$}{\text{kg}} \right) * \frac{1\text{g}}{1000\text{kg}} \quad (2.80)$$

*Cálculo de los indicadores:*

Como se declaró anteriormente el análisis emergético clasifica las entradas del sistema en recursos renovables (R), no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (F). Esto permite el cálculo de una serie de índices que nos brinda información sobre diversas características del sistema, permite establecer comparaciones entre varios escenarios para el manejo de este desde la perspectiva económica y ambiental, así como, la comparación entre diversos sistemas. A continuación, se muestran estos indicadores detalladamente.

La transformidad (Tr) expresa la cantidad de recursos necesarios para la obtención de un producto específico (Haro Sanchez, 2019). Es la relación entre la emergía total que ingresa en el sistema (Y) y la emergía de los productos que salen (Ep), su unidad es en seJ. Este índice revela una cualidad del sistema, cuanto mayor Tr más emergía se requiere para generar productos. Puede interpretarse como el valor inverso de la eficiencia de un agro ecosistema (Y) emergía incorporada por el sistema y (E) energía del recurso (Aguilar-Rivera et al., 2015). En la ecuación 2.81 se presenta la determinación de la transformidad.

$$Tr = \frac{Y}{Ep} \quad (2.81)$$

La emergía específica se define como la emergía total (Y) por unidad de masa de los productos de salida (P) por lo que su unidad es usualmente seJ/g. Como la energía es requerida para concentrar los materiales esta unidad de valor emergético (UEV) incrementa con la concentración de las sustancias. Los elementos y compuestos poco abundantes en la naturaleza por consiguiente, tienen una emergía específica mayor cuando se encuentran concentrados dado que más trabajo fue requerido para

concentrarlos, espacial y químicamente (Brown, 2004). Esta emergencia específica puede ser obtenida a partir de la ecuación 2.82.

$$Em = \frac{Y}{P} \quad (2.82)$$

La razón de renovabilidad evalúa la sostenibilidad del sistema de producción, está definido como la relación entre el contenido de energía de los recursos renovables (R) dividido por el total de energía usada para obtener el producto (Y) y se expresa en porcentaje. De aquí se deduce que los sistemas naturales tendrán valores altos de renovabilidad, mientras que valores bajos de renovabilidad indican mayor uso de recursos naturales no renovables para la obtención del producto y por consiguiente un incremento en los costos económicos asociados (Sánchez, 2006). Por tanto, refleja algunos aspectos de la sostenibilidad de un sistema o su habilidad de ser movida por recursos renovables locales debido a que sólo los procesos con un alto rendimiento (%R) son ecológicamente sostenibles. Este índice se determina por la ecuación 2.83.

$$\%R = \frac{R}{Y} * 100 \quad (2.83)$$

La razón de eficiencia energética es una medida de la habilidad del proceso para explotar y hacer disponible los recursos naturales por la inversión externa. Provee una mirada al proceso desde una perspectiva diferente ya que analiza la apropiación de los recursos locales lo que se interpreta como una contribución adicional a la economía. El valor menor posible del EYR es 1, que indica que un proceso entrega la misma cantidad de 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 superior no retroalimentan a la economía significativamente en términos energéticos y solo transforman recursos que estaban disponibles de procesos previos por lo que, al hacer esto actúan más como procesos consumidores que como procesos creadores de oportunidades para el crecimiento del sistema (Brown, 2004). La ecuación 2.84 muestra la manera de calcular este índice.

$$EYR = \frac{R + N + F}{F} \quad (2.84)$$

La razón de carga ambiental 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), es adimensional. Cuando el valor del índice es alto, mayor será el impacto ambiental del sistema. También indica que los costos económicos de producción son más altos, y

por lo que su precio final se incrementara, haciendo que el producto o zonas productoras sean menos competitivos en el mercado con una relación de carga ambiental más baja. Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos que incluyen incrementos en los costos económicos asociados (Cano et al., 2022). Mediante la ecuación 2.85 se puede obtener este indicador.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad (2.85)$$

Si el ELR y el EYR se combinan se crea un índice de sostenibilidad siendo una medida de la potencial contribución del sistema (EYR) por unidad de carga impuesta al sistema local (ELR). Este indicador (ESI) es útil para medir la apertura y los cambios de carga ocurridos a través del tiempo en procesos tecnológicos y economías (Brown & Ulgiati, 2004). Este índice se determina usando la ecuación 2.86.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (2.86)$$

## 2.6 Modelación de los indicadores energéticos-exergéticos mediante el *software Aspen Plus*

Para determinar los balances de masa y energía se utiliza el *software Aspen Plus* para desarrollar el proceso de modelación de un generador de vapor. El modelo consta de módulos unitarios de operación con calculadores de bloques (subrutinas FORTRAN). La simulación es basada en el modelo cero-dimensional, el cual es recomendado para un primer acercamiento con el fin de determinar las características básicas de este tipo de generador de vapor (de Souza-Santos, 2010). La ecuación de estado de Peng-Robinson con modificaciones de Boston-Mathias, método (PR-BM) fue utilizado para evaluar las propiedades termodinámicas. Fueron consideradas tres diferentes biomasa (bagazo, RACs, marabú) en el proceso de combustión basados en la disponibilidad y capacidad como fuente de energía. Cada biomasa dentro del paquete fue representada como un componente no-convencional, caracterizados por los atributos de estos componentes. El método de propiedades HCOALGEN fue utilizado para determinar la entalpia de biomasa de formación y la capacidad de calor específico, mientras que el método DCOALIGT fue utilizado para la estimación de la densidad. (Motta et al., 2019).

Dos modelos de reactores (RYield y RGibbs) que forman parte de la librería del *software* fueron combinados para simular la cámara de combustión del generador de vapor. Los

modelos de reactores RGibbs han sido completamente aplicados en los procesos de combustión de sólidos no-convencionales. (Haydary, 2018). Fue asumido un exceso de aire de un 30 % a 300,15 K y 0,1 MPa para determinar la cantidad de aire de combustión. La generación de vapor se puede simular mediante el modelo de cambio de fase térmico para el economizador, evaporador y sobrecalentador. La cantidad de calor producido es calculada iterativamente usando las especificaciones de diseño basado en la temperatura de los gases de salida considerando igualmente la temperatura del agua de alimentación a 353,15 K. El modelo cero-dimensional desarrollado en Aspen Plus es basado en los balances de masa y energía y validado con lo reportado en la literatura. La tabla 2.16 presenta la descripción fundamental de los bloques o componentes utilizados en la simulación.

**Tabla 2.16** Descripción de los bloques utilizados en la simulación mediante Aspen Plus.

Bloques	Tipo	Variabes
DECOM	reactor RYield	Temperatura= 298,15 K Presión= 0,1 MPa
COMRX	reactor RGibbs	Presión= 0,1 MPa
ECONOM	Calentador	Temperatura= 441,15 K Caída de presión= 0,37 MPa
EVAP	Calentador	Fracción de vapor= 1 Caída de presión= 0,37 MPa
SUPER-H	Calentador	Temperatura= 593,15 K Presión= 1,9 MPa
YIELD, B2, B5, EXC-AIR	Calculador	subrutina FORTRAN

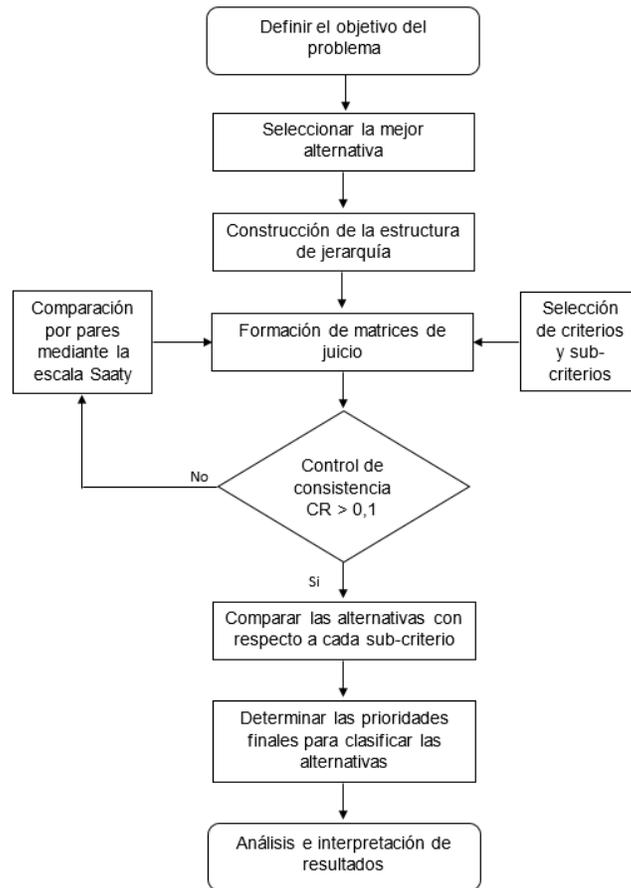
**Fuente:** (Elaboración propia)

### 2.7 Etapa 3. MDMC para la selección de alternativa

Existen métodos para la selección de alternativas aplicados a las FRE, que, si bien no se excluyen los unos a los otros, sino que sirven como complemento para una mejor toma de decisiones, entre estos está el denominado método AHP.

La metodología AHP es una herramienta robusta y flexible de toma de decisiones multicriterio para tratar problemas complejos de decisión (Daniel et al., 2010), esta metodología 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 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). En la figura 2.4 se muestra un enfoque del modelo AHP:



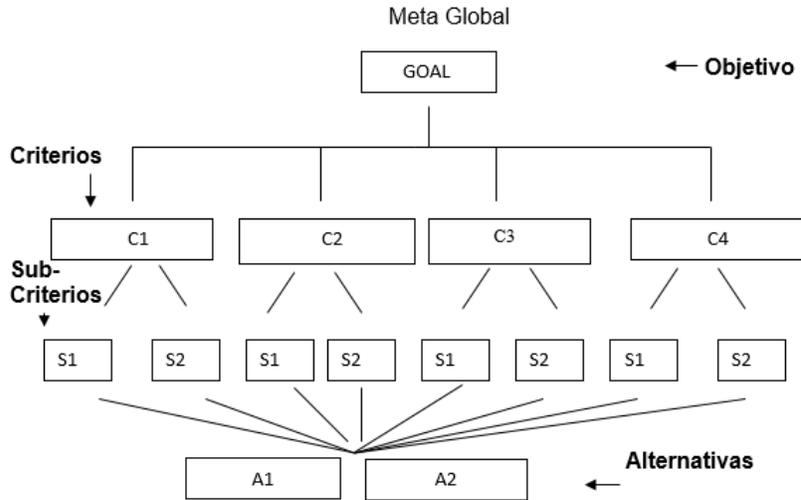
**Figura 2.4:** Enfoque propuesto para la evaluación de alternativas mediante el AHP.

**Fuente:** (Elaboración propia).

El AHP puede involucrar discusiones grupales y modificaciones para finalmente lograr un acuerdo. A continuación, se detallan los pasos desarrollados por Saaty para la aplicación de dicho método:

Paso 1: Definir objetivo: se selecciona la mejor alternativa de conversión de biomasa en energía a partir de balances energéticos, exergéticos y emergéticos.

Paso 2: Construcción de la estructura de jerarquía: se estructura 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 (Figura 2.5).



**Figura 2.5:** Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP. **Fuente:**(Saaty & Vargas, 1998).

Paso 3: Hacer comparaciones por pares para generar matrices: luego 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, (Ver Tabla 2.17) (Saaty & Vargas, 2012), estas comparaciones son llevadas a cabo por un comité de expertos con competencia en el tema abordado. Además, para determinar las prioridades de las alternativas se precisa 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 2.17:** Escala de nueve puntos Saaty para la comparación por pares.

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

**Fuente:**(Saaty & Vargas, 2012).

Paso 4: Control de consistencia: Este garantiza que los juicios de comparación por pares sean lo suficientemente consistentes al calcular la relación de consistencia (CR), primero se calcula el principio de valor propio ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) para cada matriz usando la ecuación 2.87:

$$A \times w = \lambda_{m\acute{a}x} \times w \quad (2.87)$$

Después se estima el índice de consistencia (CI) para cada matriz con la dimensión "n" utilizando la ecuación 2.88:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n-1} \quad (2.88)$$

Y finalmente se calcula el CR usando la ecuación 2.89:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.89)$$

Este valor de RI se selecciona según la dimensión de la matriz de comparación (n), en la Tabla 2.18 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 2.18:** Valores de índice aleatorio (RI) para diferentes tamaños de matrices.

Tamaño de la matriz (n)	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

**Fuente:** (Qazi et al., 2018)

## **2.8 Conclusiones parciales**

1. Se propone una metodología agrupada en tres etapas, que integra los métodos energético-exergético-emergético, para la evaluación integral de la sostenibilidad energética en el aprovechamiento de la biomasa como combustible para la industria azucarera que permite una adecuada toma de decisiones.
2. La metodología incorpora el método Delphi para la selección de expertos, el cribado de criterios y/o subcriterios para evaluar indicadores económicos, ambientales y sociales relacionados con la sostenibilidad energética.
3. La metodología adiciona la herramienta computacional Aspen Plus para triangular los resultados obtenidos mediante los métodos analíticos en la determinación de las eficiencias energéticas y exergéticas de las variantes de biomasa utilizadas.
4. Se utilizó el método de jerarquía analítica (AHP) para establecer el ranking de las alternativas de aprovechamiento de biomasa como combustible. El mismo permite estructurar el proceso de decisión multicriterial para la evaluación de la sostenibilidad energética de las variantes estudiadas, incorporando criterios en las aristas de dicho método.

**CAPÍTULO III. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.  
CASOS DE ESTUDIO**

### **CAPÍTULO III. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA. CASOS DE ESTUDIO**

Para la validación de la metodología primeramente fue determinada la cantidad de expertos a participar en el proceso de decisión para la evaluación del nivel de importancia de los criterios mediante la aplicación del método Delphi. Fueron calculadas las eficiencias energética y exergética para las variantes de estudio, así como el índice de sostenibilidad exergética, los resultados fueron triangulados mediante el *software* Aspen Plus. El desarrollo del método emergético a partir de la cuantificación de los indicadores permitió realizar una comparación de dichas alternativas. Finalmente, con la aplicación del MDMC se evaluaron todos subcriterios del estudio para evaluar los niveles de prioridades que tienen estos en cuanto a la sostenibilidad basada en costes físicos.

#### **3.1 Selección del comité de expertos**

Para el cálculo de la cantidad de expertos a participar en el proceso de decisión se desarrolla la ecuación 2.4 asumiendo una proporción del error  $p = 0,01$ , una precisión del experimento  $i = 0,05$  y un nivel de significación estadística  $(1-\alpha) = 95 \%$ , para dar como resultado que se necesitan aproximadamente 15 expertos para llevar a cabo el proceso de decisión grupal. Para ello se propusieron un total de 20 candidatos entre técnicos, profesionales de diferentes especialidades con experiencias en industrias del sector azucarero. De los 20 candidatos propuestos se seleccionaron los 15 mejores de acuerdo con su autoevaluación en la encuesta realizada (Ver Anexo 2), los cuales presentaron el nivel de competencia más alto (ver Anexo 3).

Seguidamente se realizaron los balances (energético, exergético) en una primera etapa por el método analítico de acuerdo con las variantes posibles (ver Tabla 2.1). Dichos balances fueron confrontados con la simulación en la herramienta informática Aspen Plus. Fue considerado la aplicación del método emergético para las alternativas el cual juntamente con el método energético-exergético permitieron aplicar un MDMC a dicho estudio.

##### **3.1.1 Selección de criterios y subcriterios**

Una vez conformado el grupo de expertos, estos fueron entrevistados (individualmente) para determinar los posibles criterios y subcriterios a ser utilizados en la evaluación. Para ello, se tomaron algunos de los posibles indicadores suministrados a partir del análisis energético, exergético y emergético a fin de que los expertos evaluaran la importancia de

cada uno de ellos con relación a la sostenibilidad energética, de los 23 indicadores (Anexo 4) quedaron clasificados como importantes, muy importantes y moderadamente importantes un total de 12 indicadores (ver Tabla 3.1), divididos estos en económicos, ambientales y sociales.

**Tabla 3.1.** Posibles criterios y/o subcriterios a usar en la evaluación.

<b>Aristas de la sostenibilidad</b>	<b>Métodos</b>	<b>Subcriterios</b>
Económicos	Energía	Eficiencia Energética (Método directo (En1) e indirecto (En2))
	Exergía	Eficiencia Exergética (Ex1)
	Energía	Materiales de la Economía (E1) Servicios de la Economía (E2)
Ambientales	Energía	Pérdidas de energía (PE) Eficiencia Energética <sup>2</sup>
	Exergía	Eficiencia exergética (Ex1) Índice de sostenibilidad exergética (Ex2)
	Energía	Razón de renovabilidad (Em1) Índice de sostenibilidad (Em2) Razón de carga ambiental (Em3) Eficiencia emergética(Em4)
Sociales	Energía	Materiales de la Economía (E1) Servicios de la Economía (E2) <sup>3</sup> Labor Humana (S1)

**Fuente:** (Elaboración propia).

### 3.1.2 Desarrollo del método Delphi para el cribado de los subcriterios

Una vez seleccionados los subcriterios para la investigación se procedió a realizar las encuestas (Ver Anexo 5), sometiéndolos a juicio de los expertos. Recopilada la información se aplicó el método Delphi de evaluación para el cribado de los subcriterios, utilizando para ello el *software*: Método de Consulta a Expertos.v1.0. La Tabla 3.2 muestra el nivel de importancia que cada experto le confiere a los subcriterios analizados para alcanzar el objetivo propuesto en la investigación. Por su parte, en el Anexo 6 se

<sup>2</sup> Considerado como la reducción de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

<sup>3</sup> Los indicadores emergéticos E1 y E2, aunque están considerados en la arista económica pueden ser considerados además en la arista social.

muestra el desarrollo del método Delphi con el *software* anteriormente mencionado, y los resultados se presentan a modo resumen en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.2.** <sup>4</sup>Evaluación de los expertos del nivel de importancia de los subcriterios.

Subcriterio	Experto															C
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
E1	I	P	M	P	M	M	I	M	I	I	M	M	M	I	I	<b>M</b>
E2	M	I	P	S	I	M	I	M	I	P	M	P	I	I	M	<b>I</b>
PE	I	I	MI	I	I	I	MI	MI	I	I	MI	I	I	I	MI	<b>I</b>
En1	I	I	M	M	M	I	MI	P	P	I	I	M	I	I	M	<b>I</b>
En2	I	I	I	I	M	I	MI	M	P	I	I	M	I	I	M	<b>I</b>
Ex1	MI	I	I	I	M	M	I	M	M	I	I	M	M	I	M	<b>I</b>
Ex2	MI	I	I	I	I	I	MI	M	M	I	I	M	I	MI	M	<b>I</b>
Em1	MI	M	I	I	MI	MI	I	MI	MI	I	MI	MI	I	I	MI	<b>I</b>
Em2	MI	I	I	I	MI	MI	MI	MI	MI	I	MI	MI	I	I	MI	<b>MI</b>
Em3	I	M	M	M	M	I	I	MI	I	M	I	MI	I	I	MI	<b>I</b>
Em4	M	M	M	MI	MI	MI	M	M	I	MI	M	I	I	I	MI	<b>I</b>
S1	P	P	P	M	M	M	M	M	M	P	P	M	P	S	P	<b>I</b>

**Fuente:** (Elaboración propia).

De los resultados obtenidos en el proceso de cribado se tiene que los subcriterios que alcanzaron una evaluación (nivel de importancia) de Importante y Muy Importante fueron: PE, En1, En2, Ex1, Ex2, Em1, Em2, Em3, Em4, S1, E1 y E2. Sin embargo, existe una relación entre los subcriterios Em2 y Em3 debido a que la razón de carga ambiental es un parámetro a tener en cuenta a la hora de determinar el índice de sostenibilidad energético e influye de manera inversamente proporcional en la magnitud de este. El subcriterio Em2 es considerado en la literatura como un indicador más integral en comparación con Em3, ya que brinda una mayor información económico-ambiental de los sistemas evaluados, además este recibió un mayor nivel de importancia de parte de los expertos para alcanzar el objetivo de esta investigación.

### 3.2 Determinación de la eficiencia energética por el método directo e indirecto.

La eficiencia energética puede ser determinada mediante el método directo e indirecto (Rubio-González, 2015). El anexo 7 presenta el poder calórico inferior de cada uno de los combustibles, las entalpías específicas de los productos de la combustión y el aire,

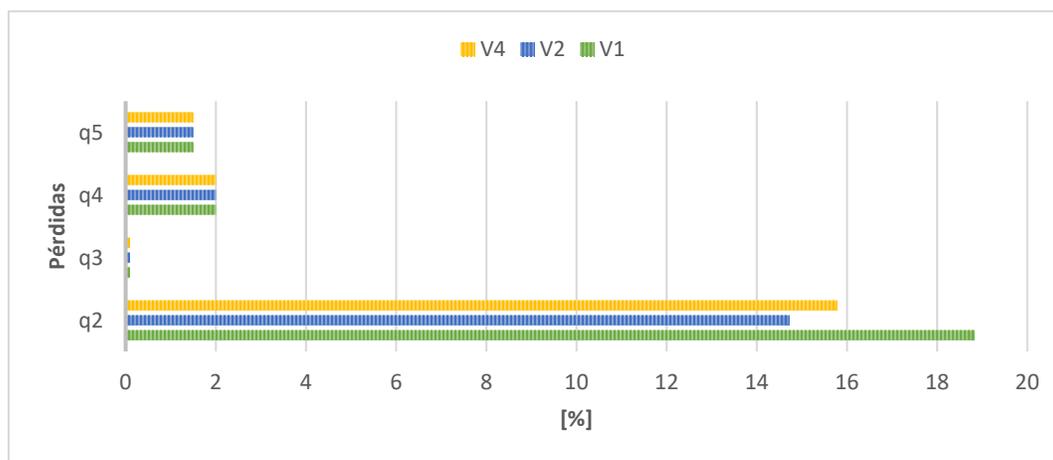
<sup>4</sup> Nota: W=0,796, C: Calificación de los Expertos.

así como, para las diferentes variantes de combustibles pueden ser consultadas en el anexo 8 y anexo 9.

Los volúmenes teóricos del aire y de los gases producto de la combustión, tales como,  $RO_2$ ,  $N_2$  y  $H_2O$  para los combustibles en cuestión, son obtenidos a partir de las ecuaciones descritas en el capítulo 2 respectivamente para el caso de las distintas variantes. El anexo 10 muestra los resultados obtenidos.

Para el caso de la determinación de la eficiencia en el proceso primeramente fueron estimadas las diferentes pérdidas. La pérdida debida a los gases de escape ( $q_2$ ), la cual dependen del coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera, para nuestro caso de estudio se fijó el coeficiente de exceso de aire en 1,8 para un G.V tipo VU-40 y 2 para el G.V tipo Retal.

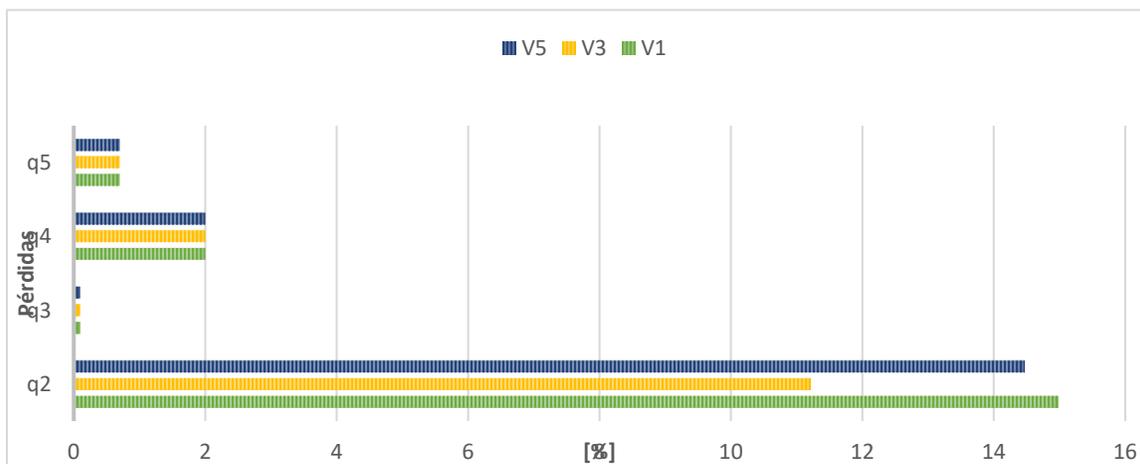
Analizando las pérdidas de energía desde el punto de vista ambiental, determinadas por el método indirecto podemos ver que las pérdidas  $q_3$ ,  $q_4$  y  $q_5$  solo tienen una ligera disminución del caso 2 (Figura 3.2) al caso 1 (Figura 3.1), sin embargo, la pérdida  $q_2$  en el caso de la tecnología Retal oscilan entre un 14 %-18 %, y en el caso de la variante de alta presión las perdidas oscilan entre 11 %-15 %. Estas disminuciones en las pérdidas a la vez traen consigo disminuciones similares en las emisiones de  $CO_2$  al medio ambiente por lo que pueden considerarse como un parámetro ambiental.



**Figura 3.1:** Pérdidas de energía por el método indirecto para el G.V tipo Retal. **Fuente:** (Elaboración propia).

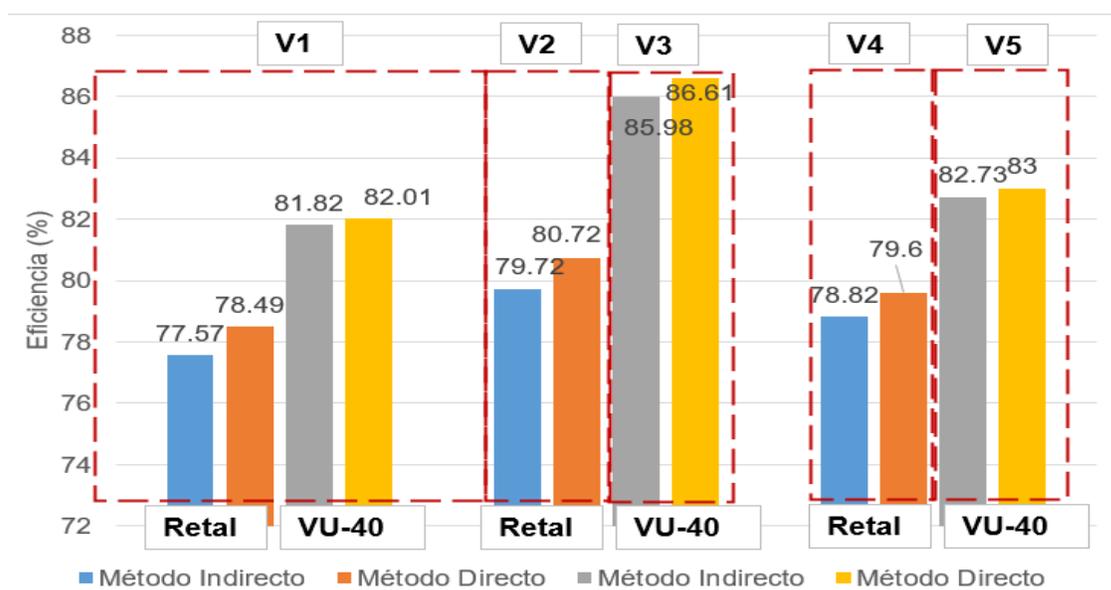
Para los casos de estudio se determinaron el porcentaje de las pérdidas por incombustión química ( $q_3$ ), el porcentaje de pérdidas por incombustión mecánica ( $q_4$ ) y el porcentaje de

pérdidas por enfriamiento exterior ( $q_5$ ) de acuerdo con (Rubio-González, 2015), ver anexo 11, todas estas pérdidas se pueden apreciar en la figura 3.1 y figura 3.2 donde se evidencia que las mayores corresponden a las pérdidas por los gases de escape como se indicó anteriormente.



**Figura 3.2:** Pérdidas de energía por el método indirecto para el G.V tipo VU-40. **Fuente:** (Elaboración propia).

Se determinaron las eficiencias energéticas para cada una de las Variantes dependiendo de la tecnología considerando ambos métodos directo Ec. 2.14 e indirecto Ec 2.15, con el objetivo de conocer las eficiencias de cada una de las combinaciones analizadas. La determinación de la masa de trabajo para cada una de las mezclas está representada en el Anexo 12, en la figura 3.3 se presentan los resultados obtenidos.



**Figura 3.3** Valores de eficiencia energética por ambos métodos en % de las variantes evaluadas. **Fuente:** (Elaboración propia).

En la figura 3.3 se observa la eficiencia energética por ambos métodos para los dos estudios de casos en las variantes a aplicar. En la mayoría de los casos no existen diferencias significativas en los resultados obtenidos por ambos métodos. Del análisis del gráfico se puede observar que en caso de la tecnología VU-40 existe un aumento de un 5,2 % promedio de la eficiencia energética, que para el caso de la V1 que fue la única posible a evaluar en los dos estudios de casos. Comparando las mezclas posibles a trabajar en la RETAL vemos que para el caso de los RAC aumentan las eficiencias en un 2,8 % lo que puede ser explicado ya que el RAC presentan mayor poder calórico, un mejor aprovechamiento de la energía. La V4 se comportó en valores promedios entre las V1 y V2.

En el caso de la tecnología VU 40 se observa también para la variante V3 un aumento de la eficiencia energética del orden de un 5,3 %, debido a mayor poder calórico del marabú y la posibilidad de trabajarlo con menor exceso del aire. Mientras tanto, la variante V5 se comporta acorde con los resultados de la variante V1. Los resultados de la eficiencia energética mostrados en la figura 3.3 para el caso de un G.V de altos parámetros y con bagazo como combustible son similares a los reportados por (Guerra et al., 2020; Cruz et al., 2013). La Tabla 3.3 presenta los valores de rendimiento energéticos estimado para

escenarios similares, resaltando la correspondencia con la evaluación aportada en este estudio.

**Tabla 3.3** Valores de eficiencia energética y bibliografía consultada.

<b>Eficiencia Energética [%]</b>	<b>Tipo de Tecnología</b>	<b>Fuente consultada</b>
77-88	Altos parámetros (Presión y Temperatura)	Guerra et al (2020)
86	Altos parámetros (Presión y Temperatura)	Franck et al (2011)
76 – 80	Retal	Rubio González & Clara (2019)
77,9	Retal	Barroso et al (2003)

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.3 Análisis exergético

El análisis exergético fue evaluado para las distintas variantes y casos de estudios. Partiendo de las ecuaciones 2.47, 2.48, 2.52 y 2.54 fueron calculadas las exergías del agua alimentar, de los combustibles, de los gases de escape y del vapor producido respectivamente para cada una de las variantes en dependencia del porcentaje de composición de la mezcla, y de los diferentes valores de entalpías, entropías y las condiciones de los gases de escape con la ayuda del *software Chemical Logic Steam Tab Companion* (CLSTC o Tablas de Vapor). En los anexos del 13-21 se resumen los resultados intermedios de dicha evaluación.

#### 3.3.1 Determinación de la eficiencia exergética e índice de sostenibilidad

Una vez obtenidas las exergías de las entradas y las salidas se determina las eficiencias exergéticas mediante la ecuación 2.56. En la tabla 3.5 se muestran los valores de eficiencias calculados.

**Tabla 3.5:** Valores de eficiencia exergética en función de la tecnología. Método analítico

Variantes	Eficiencia exergética del generador de vapor [%]	
	G.V Retal	G.V VU-40
V1	26,69	28,35
V2	37,68	-
V3	-	31,81
V4	32,18	-
V5	-	29,11

**Fuente:** (Elaboración propia).

Desde la arista económica, para el caso de las tres variantes considerando el G.V tipo Retal se observa para el caso de los RAC un aumento de la eficiencia exergética del 29,1 % comparado con la variante V1. De las tres variantes posibles a evaluar en el G.V VU-40 existe un aumento de la eficiencia exergética de alrededor de un 10,9 % con el uso del marabú en comparación con el bagazo. Como se puede observar en la Tabla 3.5 los valores mayores de pérdidas de exergía los representa la V1, con una eficiencia exergética respectiva de 28,35 %. Tomando en consideración la variante V1 en ambas tecnologías, existe un incremento de un 5,9 % del caso de estudio 2 en comparación con el caso 1, estos resultados obtenidos además son similares a los reportados por (Kamate & Gangavati, 2009; Echeverry Arbeláez, 2017). La Tabla 3.6 presenta un resumen de los resultados en la literatura, así como la bibliografía consultada para la obtención de estos.

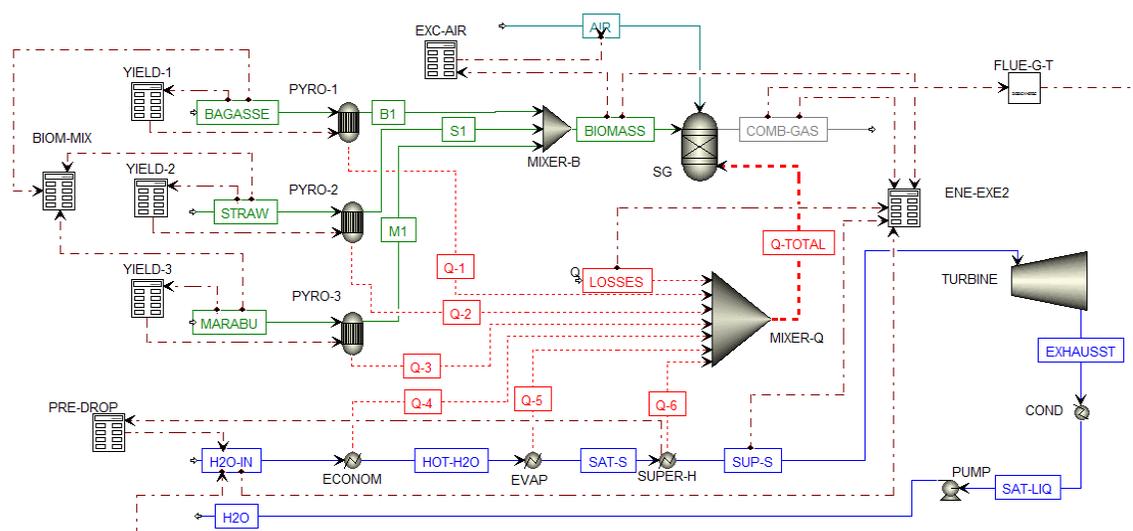
**Tabla 3.6** Valores de eficiencia exergética y bibliografía consultada.

Eficiencia exergética [%]	Tipo de tecnología	Bibliografía consultada
21-35,7	Altos parámetros	Kamate & Gangavati (2009)
23,2	Altos parámetros	Fals Acuña et al (2010)
22	Altos parámetros	Echeverry Arbeláez (2017)

**Fuente:** (Elaboración propia).

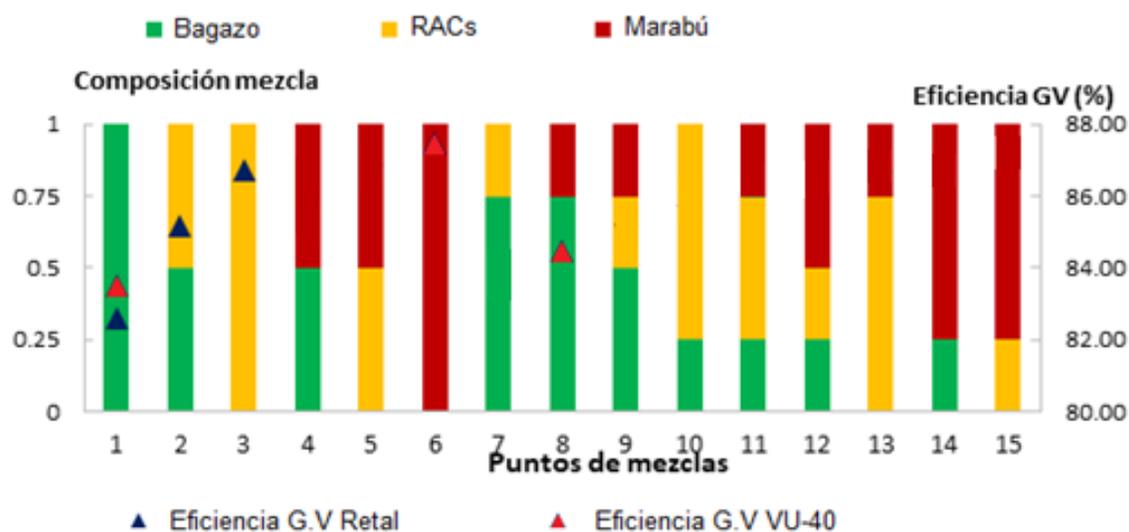
### 3.4 Simulación de las eficiencias energéticas-exergéticas mediante el Aspen Plus

La figura 3.4 representa el esquema de simulación mediante el *software* Aspen Plus



**Figura 3.4** Esquema principal para la determinación de la eficiencia energética-exergética. **Fuente:** (Aspen Plus v13.1)

La figura 3.5 presenta mediante simulación la determinación de la eficiencia energética para ambos casos de estudio considerando los por ciento de composición de la mezcla. Las mayores eficiencias energéticas se obtienen cuando se considera 100 % marabú con un 87,48 %, y para 100 % RAC con una eficiencia de 87,31 %. Si bien la utilización enteramente de estos combustibles presenta un mejor comportamiento energético, es necesario tener en cuenta los costos adicionales que incluyen los RAC y el marabú que deciden utilizar siempre el bagazo como combustible base ya que la mayor parte de este se obtiene en el propio proceso azucarero.



**Figura 3.5<sup>5</sup>.** Determinación de la eficiencia energética mediante simulación en Aspen Plus. **Fuente:** (Elaboración propia)

Para el caso de la utilización de la mezcla bagazo-RAC como combustible, la eficiencia energética obtenida como promedio fue de un 84,95 %, que representa un 3,3 % superior que para la utilización de bagazo solamente. Golato et al (2017) afirman que es posible utilizar mezclas de bagazo con RAC en calderas bagaceras convencionales como las del tipo Retal.

Los valores más bajos de eficiencia energética obtenidos por el método analítico están representados por la utilización del bagazo con un 77,67 % por el método indirecto y con un 78,5 % por el método directo, resultados similares a los reportados por (Cristóbal Falcón, 2011; Barroso et al., 2003; Rubio González & Clara, 2019; Mbohwa, 2006), siendo estos ligeramente inferiores que en relación a la simulación.

Para el caso del bagazo, los resultados de la simulación considerando ambos casos de estudios fueron de 82,62 % y 83,99 % respectivamente. Estos resultados son además ligeramente superiores al obtenido por (Cavalcanti et al., 2020; Cortés Falcón et al., 2019; Franck Colombres et al., 2011; Rubio González & Clara, 2019; Barroso et al., 2003), estos

<sup>5</sup> Leyenda

1: V1; 3: V2; 6:V3; 2:V4; 8: comparable con V5

últimos determinaron la eficiencia energética de un G.V de 12,5 kg/s utilizando bagazo como combustible en un 79 %, considerando un coeficiente de exceso de aire  $\alpha = 1,8$ . Sin embargo (Rein, 2012) indica la eficiencia del G.V en base al P.C.S para el caso del bagazo en 68,06 %, para un 50 % de humedad del bagazo y una temperatura de los gases de salida de 486,15 K. Para el caso de bagazo solo en caldera tipo lecho fijo (Rodríguez Arias et al., 2019) estimó la eficiencia energética en un 77 %. El autor evalúa la mezcla de bagazo y RAC, demuestra cómo a medida que disminuye el porcentaje de bagazo en el conjunto, también baja la temperatura de los gases de salida e inversamente, la eficiencia de la caldera aumenta su valor, llegando incluso, con el 100 % RAC, hasta un 87 % de eficiencia energética.

Los resultados de la eficiencia exergética para la simulación obtenidos para el bagazo estuvieron en el orden del 30 %. Estos resultados son similares a los obtenidos por (Singh, 2019; Cavalcanti et al., 2020) cuyos valores de eficiencia exergética se comportaron en un 29,36 % y 38,43 % respectivamente. Sin embargo, Ameri et al (2008) determinaron en su estudio la eficiencia exergética de un generador de vapor para diferentes temperaturas ambientes. Considerando una temperatura ambiente de 297,15 K la eficiencia exergética fue estimada en un 44 %.

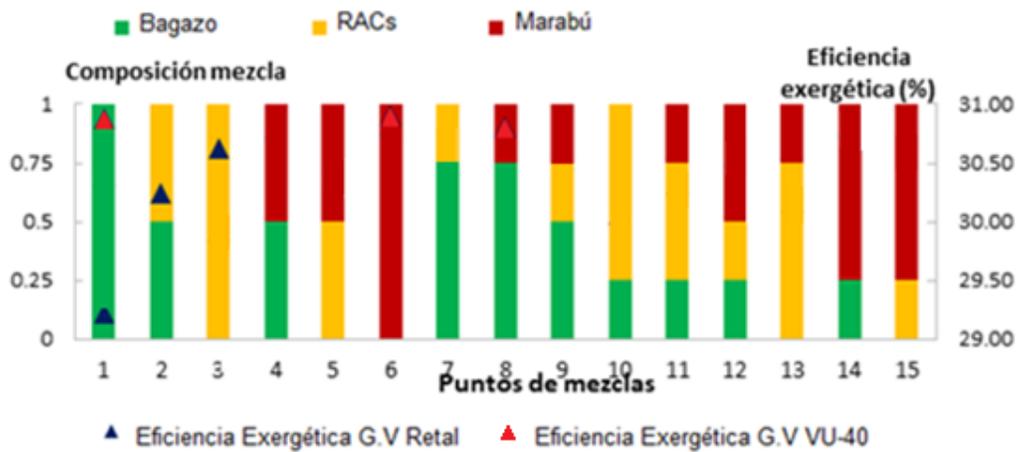
Por otra parte, los valores más altos de eficiencia exergética están representados por la utilización del marabú con 30,96 %, sin embargo, para el caso de bagazo, este presenta una eficiencia exergética de 30,81%. Además Khattak et al (2018) determinaron para el bagazo una eficiencia exergética entre 28,7 %-39 %, y Ameri et al (2008) establecieron en su estudio la eficiencia exergética de un G.V en un 44 %. Considerando la incorporación de la mezcla bagazo-RAC, la eficiencia exergética obtenida fue de 29,61 %, ligeramente superior al obtenido por (Guerra et al., 2020).

El diagnóstico exergético de López & León (2015) muestran una eficiencia exergética de 18,4 %, con las mayores pérdidas por irreversibilidad en la combustión, también sugieren que esta eficiencia se encuentra dentro del límite inferior de las bases de datos especializados en calderas de bagazo. Fals Acuña et al (2010), en su investigación demostraron que el subsistema de caldera de bagazo analizado tiene una eficiencia exergética de 19,2 % y es aquí donde se presentan las mayores irreversibilidades, este valor de eficiencia es ocasionado por malas operaciones, lo que trae como consecuencia altos valores de temperatura presentes en los gases de salida, estos autores refieren que

dicho valor de eficiencia puede llegar hasta un 23,2 %; Amaya (2014) expresa que la eficiencia exergética y la potencia eléctrica de salida son máximas cuando aumenta la presión y temperatura de generación de vapor en la caldera, pudiendo alcanzar una eficiencia del 29,21 % similar al estudio que se presenta.

Acuña & Abanto (2017) afirman que la eficiencia exergética en una planta azucarera en San Jacinto fue de 23,2 % y demostraron que utilizar bagazo residual en la gasificación de bagazo para generar gas de síntesis y utilizarlo en un ciclo combinado para la producción de energía eléctrica, es más eficiente que de forma convencional y es posible aumentar la eficiencia exergética y energética de la planta de cogeneración. Echeverry Arbeláez (2017) realizó el análisis exergético de una caldera de bagazo y carbón, en el cual se identificaron las zonas más críticas que generan gran cantidad de exergía destruida, los resultados de su estudio demostraron que la eficiencia exergética fue del 22 %.

La tabla 3.7 presenta los valores de eficiencia exergética en función de la tecnología mediante simulación, a partir de los cuales se calculan los índices de sostenibilidad exergética.



**Figura 3.6** <sup>6</sup>Comparación de la eficiencia exergética mediante simulación en Aspen Plus. **Fuente** (Elaboración propia)

<sup>6</sup> Leyenda

1: V1; 3: V2; 6:V3; 2:V4; 8: comparable con V5

**Tabla 3.7:** Valores de eficiencia exergética e índice de sostenibilidad en función de la tecnología. Simulación

Variantes	Eficiencia exergética del generador de vapor [%]		Índice de Sostenibilidad Exergética (Ex2)	
	G.V Retal	G.V VU-40	G.V Retal	G.V VU-40
V1	29,22	30,81	1,33	1,48
V2	30,76	-	1,51	-
V3	-	30,96	-	1,58
V4	29,61	-	1,37	-
V5	-	30,84	-	1,53

**Fuente:** (Elaboración propia).

Tomando en consideración la variante V1 en ambos casos de estudio, se observa un incremento de un 5,2 % del caso de estudio 2 con relación al caso 1. Para el caso del índice Ex2 el incremento de este se corresponde con los valores obtenidos de eficiencia para los casos evaluados.

### 3.5 Aplicación del método emergético

Para determinar los indicadores emergéticos primero se clasificaron las corrientes que intervienen en el proceso (Tabla 3.7). El análisis tiene en cuenta los recursos renovables (R), no renovables (N), recursos materiales de la economía (M) y servicios de la economía (S), que son los diferentes insumos e indicadores emergéticos que permiten obtener este análisis.

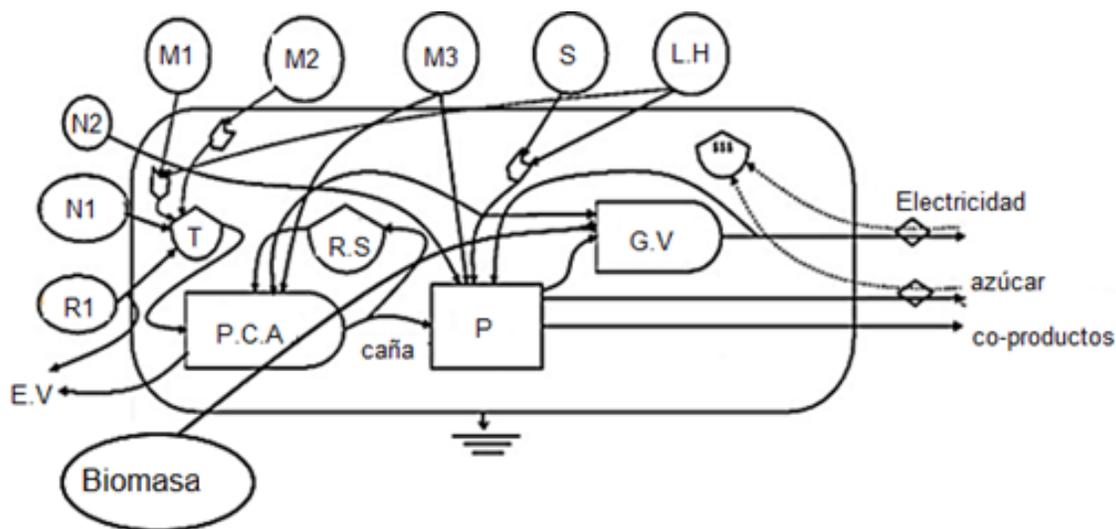
**Tabla 3.7** Principales corrientes dentro del proceso necesarias para la evaluación emergética.

Flujos	Bagazo	Bagazo - RAC	Marabú	Unidad/año	Clasificación
Aire	7,5453E+13	9,7185E+13	1,20078E+14	J	R
Bagazo	6,1600E+07	3,0800E+07	-	kg	R
RAC	-	1.7224E+07	-	kg	R
Marabú			5,6E+07	kg	
Aire	9,8529E+12	1,2791E+13	1,06706E+13	J	N
Agua	1,2600E+08	1,2600E+08	1,2600E+11	kg	N
Costo RT bagazo	4,6200E+07	9,2400E+07	-	\$	M
Costo del Marabú	-	-	1,0528E+06	\$	
Costo del Agua	4,1580E+04	4,1580E+04	4,1580E+04	\$	M
Mantenimiento	2,8000E+02	2,8000E+02	2,8000E+02	\$	S
Labor humana	1,2056E+07	1,3012E+07	1,6012E+07	J	S
Costo recogida+transportación Bagazo/RAC	-	2,3192E+08	-	\$	M

**Fuente:** (Elaboración propia)

La modelación emergética parte de delimitar los límites del sistema en estudio. Los sistemas termodinámicos se definen como cualquier región espacial dentro de un límite prescrito seleccionado para estudio y debe establecerse para un tiempo dado ya que este es un factor que define los flujos que pasan por el sistema. Para esta etapa lo que se necesita es cuál es el objeto de análisis y durante qué período de tiempo se realizará la evaluación. El límite del estudio lo contempla el proceso de generación de vapor a partir de la biomasa, para lo cual es necesario definir las corrientes que intervienen en él. La

modelación emergética en sí consiste en la representación mediante diagramas de flujos de materia y energía utilizando la simbología descrita para ello, con el fin de representar la interacción entre las fuentes internas y externas del sistema, además de los flujos de salida y retroalimentación del sistema. (Brown & Ulgiati, 2010; Brown & Ulgiati, 2011; Lei et al., 2014). La función principal de este paso es la organización de los datos, permitiendo determinar los flujos e interacciones en el sistema, destacando los más relevantes. La escala y el grado de detalle pueden variar según los objetivos y el tipo de ecosistema. La figura 3.7 presenta el diagrama emergético para el estudio.



**Figura 3.7<sup>7</sup>.** Diagrama emergético para los casos de estudio. **Fuente:** (Elaboración propia)

El insumo primario al sistema analizado, es decir, en el caso del bagazo y RAC, se toman en cuenta las condiciones en el proceso de la caña. Se consideró el caso del marabú como insumo directo al proceso de generación de vapor y aporte de la investigación, comparando los resultados obtenidos para el caso de los indicadores Amponsah et al (2014), presentan un análisis emergético para la caña de azúcar donde el EYR, ELR y ESI resultaron 9,51, 5,44 y 1,75, superiores a los datos en la Tabla 3.8 debido a que estos últimos se enmarcan fundamentalmente en el proceso de generación de vapor.

<sup>7</sup> Leyenda: E.V: Evaporación y transpiración, R1: Radiación Solar, N1: Precipitación, N2: Aire, M1: Fertilizantes, M2: pesticidas y herbicidas, M3: Combustibles, S: Servicios, L.H: Labor Humana, G.V: Generación de Vapor, R.S: Semilla de reserva, T: Suelo cultivable, P.C.A: Producción de caña de azúcar, P: Proceso.

**Tabla 3.8** <sup>8</sup> Indicadores emergéticos para el empleo de la biomasa en un G.V tipo VU-40.

Indicadores emergéticos	VU-40		
	V1	V3	V5
Razón de renovabilidad (%R)	62,67	42,54	50,22
Razón de eficiencia emergética (EYR)	3,53	2,01	2,46
Razón de carga ambiental (ELR)	2,92	3,97	3,01
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	5,96	2,72	3,91
Materiales de la Economía (E1)	5,1100E+07	7,2400E+07	6,7800E+07
Servicios de la Economía (E2)	2,9000E+02	3,7100E+02	2,8600E+02
Labor humana (S1)	1,4256E+07	1,6012E+07	1,5832E+07

**Fuente:** (Elaboración propia)

Desde la perspectiva económica realizando una comparación a partir de los indicadores E1 y E2, como se muestra en la Tabla 3.8 para el caso de la variante V1 estos representan las menores partidas de gastos, estos representan un 29,4 % inferior que para el caso de la variante V3, así como, un 24,6 % que, en comparación con la V5, dado fundamentalmente por la consideración de recogida y transportación de esta biomasa. Estos indicadores descritos anteriormente, aunque son considerados intermedios se puede decir que tienen influencia en los restantes indicadores emergéticos. Los gastos para la tecnología VU-40 de estos indicadores tomando como base el bagazo son superiores en un 9,6 %, para dicha tecnología puede estar considerado el traslado igualmente de bagazo de zonas aledañas.

El índice de renovabilidad fue determinado en un (62,67 %), superior en un 25 % dado por (Mandade et al., 2016) para la producción de bioetanol, y el índice de eficiencia emergética (3,53) superior a 2, muestran que los recursos naturales son moderadamente explotados, resultado superior al dado por Agostinho & Ortega (2013) de 1,39 para el caso de una evaluación energético-ambiental de un escenario en Brasil para el caso de

---

<sup>8</sup> Los indicadores E1 y E2 están evaluados en pesos y el indicador S1 esta evaluado en J

una biorefinería. Además, el valor bastante bajo del índice de carga ambiental del proceso (2,92) muestra que tiene un impacto ambiental bajo, inferior al 3,1 dado por Agostinho & Ortega (2013) para un esquema de etanol convencional.

La relación entre el valor del índice de eficiencia energética (EYR) y el índice de carga ambiental (ELR) se refleja en el índice de sostenibilidad energética (ESI = 5,96), esta muestra que, a largo plazo, el sistema es sostenible por sí mismo porque este valor es superior a 5, donde Mandade et al (2016) a partir de una evaluación energética de la biomasa determina el ESI inferior a 1; sin embargo, el valor obtenido da una medida de que el sistema contribuye moderadamente a la economía.

En el análisis de los indicadores energéticos para el caso de la variante V3, este da como resultado un índice de renovabilidad (% R = 42,54), representando un 32,1 % inferior que para el caso de la V1 y el índice de eficiencia energética (EYR = 2,01) indican que los recursos naturales locales son moderadamente explotados durante el proceso. El impacto ambiental no es tan grande en comparación con otros procesos debido al bajo valor de la relación de carga ambiental (ELR = 3,97), aunque superior en un 26,4 % en comparación con el bagazo y el impacto existente debe evaluarse teniendo en cuenta las áreas circundantes.

A pesar de lo anterior, el índice de sostenibilidad energética (ESI) indica que en el largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo (ESI < 5). La tabla 3.9 presenta los indicadores energéticos para las distintas variantes de biomásas en un G.V tipo Retal. Como se observa en este tipo de G.V es más favorable la utilización de bagazo a largo plazo que otros combustibles adicionales, sin embargo, la mezcla de Bagazo-RAC de acuerdo con los indicadores obtenidos pueden representar una oportunidad de utilización.

**Tabla 3.9.** <sup>9</sup>Indicadores emergéticos para el empleo de la biomasa en un G.V tipo Retal.

Indicadores emergéticos	RETAL		
	V1	V2	V4
Razón de renovabilidad (%R)	58,04	23,58	39,55
Razón de eficiencia emergética (EYR)	2,38	1,31	2,28
Razón de carga ambiental (ELR)	0,72	3,24	1,53
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	5,30	0,40	1,49
Materiales de la Economía (E1)	4,6200E+07	9,2400E+07	6,1300E+07
Servicios de la Economía (E2)	2,8000E+02	3,0100E+02	2,8700E+02
Labor humana (S1)	1,2056E+07	1,3012E+07	1,2532E+07

**Fuente:** (Elaboración propia)

Por otro lado, en la mezcla de bagazo-RAC, la razón de renovabilidad (23,58 %), superior en un 18,77 % dado por Vitória & Rodrigues (2016) pero en ambos casos inferior al de la utilización de bagazo, sin duda la recolección y costo de la recogida del RAC incide en esta renovabilidad del sistema y la razón de eficiencia emergética (1,31) muestra que el sistema explota los recursos naturales en una cantidad mucho menor; esto se debe a que el costo de recolección y transporte del RAC es superior que el del bagazo. En el caso del índice de carga ambiental (3,24), muestra que tiene un mayor impacto en el medio ambiente en comparación con el bagazo, Vitória & Rodrigues (2016) también indica un mayor impacto ambiental en el caso de los RAC, siendo 4,33, aunque su valor cercano a 2 demuestra que también tiene un bajo impacto ambiental. En el caso del índice de sostenibilidad emergética para la mezcla de bagazo-RAC, tiene un valor bastante bajo, ESI = 0,40, lo que demuestra que a largo plazo no es sostenible.

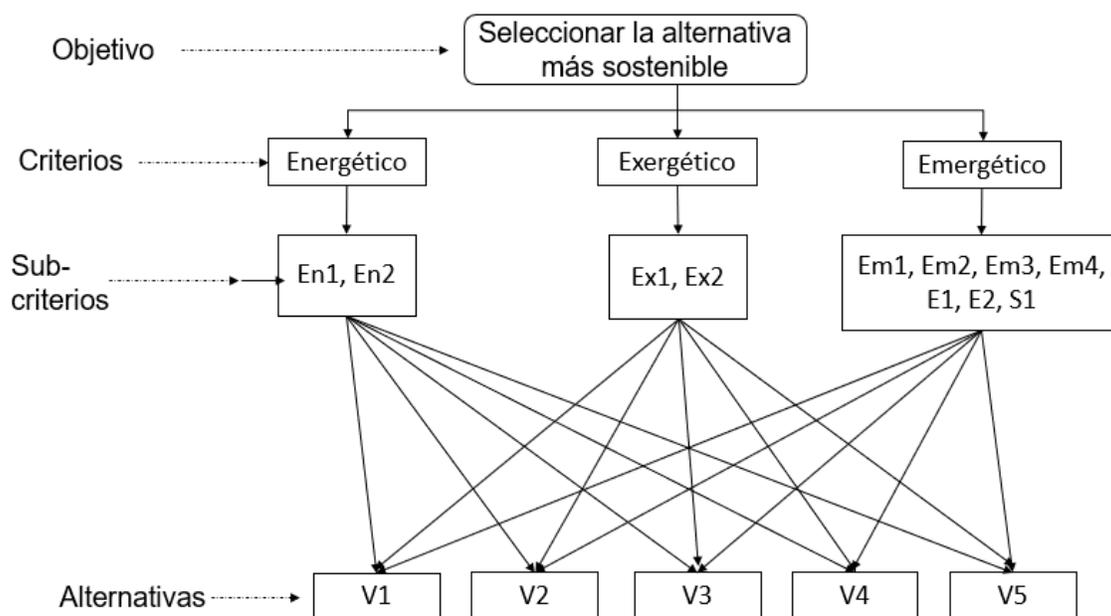
Comparando los indicadores obtenidos para las mezclas de biomasa en un G.V tipo Retal (Tabla 3.9) con los obtenidos para el caso de un G:V tipo VU-40 (Tabla 3.8) se observa que la consideración del bagazo como combustible base juega un rol decisivo, presentando indicadores oportunos en ambos casos de estudio de evaluación.

---

<sup>9</sup> Los indicadores E1 y E2 están evaluados en pesos y el indicador S1 esta evaluado en J

### 3.6 MDMC para los criterios evaluados en el estudio

Según el método AHP; las alternativas modificadas, los sub-criterios y los criterios se distribuyen en una estructura jerárquica multinivel, la cual se muestra en la Figura 3.8:



**Figura 3.8:** 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, como se muestra en la Figura 3.9. 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 indirecto (En1), la eficiencia energética por el método directo (En2), la eficiencia exergética (Ex1), el índice de sostenibilidad exergética (Ex2), la razón de renovabilidad (Em1), la razón de eficiencia emergética (Em2), la razón de carga ambiental (Em3), el índice de sostenibilidad (Em4), los materiales de la economía (E1), servicios (E2) y Labor Humana (S1).

Las alternativas consisten en la determinación de la sostenibilidad de las diferentes variantes o mezclas de biomasa abordadas anteriormente, seleccionadas para ello la

variante V1, V2y V4 para el caso de la tecnología Retal y las variantes V1, V3 y V5 para el caso de la tecnología VU-40. 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. Esta evaluación de criterios esta presentada en el Anexo 34

La matriz (Tabla 3.10) se dispuso en base a los factores identificados de balance energético, exergético y emergético y la calificación numérica para la comparación de cada elemento se asignó de la escala de nueve puntos de Saaty (Tabla 2.17).

En la matriz de 3x3 (Tabla 3.10) 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 3.10 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.

Para generar el vector de prioridad local (PVE) o el vector propio correctamente normalizado para los juicios de matriz en la Tabla 3.11, 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 3.11. Por lo tanto, los vectores de prioridad local resultantes de los cálculos manuales se pueden dar como: (0,164, 0,297, 0,539). La normalización de las matrices para cada uno de los criterios evaluados en el estudio puede ser consultadas en los Anexos 32-38.

**Tabla 3.10:** Comparación matricial por pares de los criterios con respecto al objetivo.

	Energía	Exergía	Energía	Vector de prioridad local (PVE)
Energía	1	1/2	1/3	0,164
Exergía	2	1	1/2	0,297
Energía	3	2	1	0,539

**Fuente:** (Elaboración propia).

**Tabla 3.11:** Computación del vector de prioridad local.

	Energía	Exergía	Energía	Vector de prioridad local (PVE)
Energía	0,167	0,143	0,182	0,164
Exergía	0,333	0,286	0,273	0,297
Energía	0,500	0,571	0,545	0,539

**Fuente:** (Elaboración propia).

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 2.87:

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

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

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 2.88, 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 2.89:

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

El valor de RI es 0,58 y se seleccionó de la Tabla 2.18 para n = 3 (tamaño de matriz). Como el valor de CR (0,00794) es menor que 0,05 (límite máximo permitido), los juicios en la matriz (Tabla 3.11) se consideran consistentes y lógicamente satisfactorios.

La siguiente evaluación, mostrada en la Tabla 3.12, implica la comparación para derivar los efectos del sub-factor en el factor primo.

**Tabla 3.12:** Comparación matricial por pares de los sub-criterios con respecto a criterios relativos.

Criterio	Energético		Exergético		Emergético							Vector prioridad
	En1	En2	Ex1	Ex2	Em1	Em2	Em3	Em4	E1	E2	S1	
En1	1	1/2	-		-	-	-	-				0,66
En2	2	1	-		-	-	-	-				0,33
Ex1	-	-	1	1/3	-	-	-	-				0,25
Ex2			3	1								0,75
Em1	-	-	-		1	1/3	1/5	1/5	2	3	3	0,09
Em2	-	-	-		3	1	2	1/3	3	5	5	0,20
Em3	-	-	-		3	1/2	1	1/3	3	3	4	0,15
Em4	-	-	-		5	3	3	1	7	7	9	0,41
E1					1/2	1/3	1/3	1/7	1	2	3	0,07
E2					1/3	1/5	1/3	1/7	1/2	1	2	0,05
S1					1/3	1/5	1/4	1/9	1/3	1/2	1	0,03

**Fuente:** (Elaboración propia).

La etapa final implica la evaluación en función de los criterios y sub-criterios individuales. Los juicios emitidos sobre las comparaciones por pares con respecto a cada criterio y sub-criterio se forjaron en base a los resultados mostrados en los epígrafes anteriores, y formaron seis matrices (Anexo 35-40) que se evaluaron para obtener vectores de prioridad.

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. La Tabla 3.13 muestra los resultados en la forma general para el caso de las variantes consideradas en el G.V tipo Retal y las consideradas en el G.V VU-40.

**Tabla 3.13:** Resultados finales en forma de prioridades general.

Criterios/alternativas	Prioridad general	Criterios/alternativas	Prioridad general
V1	0,45	V1	0,53
V2	0,28	V3	0,25
V4	0,25	V5	0,22

**Fuente:** (Elaboración propia).

A partir del desarrollo del método AHP y mediante las ponderaciones de los expertos, estos tomaron en consideración que los subcriterios emergéticos son los de mayor peso en la sostenibilidad con el vector de prioridad local PVE de 0,539, seguido de los criterios exergéticos y energético respectivamente  $PVE=0,297$ ,  $PVE=0,164$ . La distribución por pesos para la evaluación fue tomada de acuerdo con los expertos de la manera siguiente: la eficiencia energética por el método directo En1 con un 66 % de importancia dentro del criterio energético, el índice de sostenibilidad exergética Ex2, con un 75 % dentro del criterio exergético, así como el índice de sostenibilidad emergética con un 41 %. No obstante, quedó demostrado que los combustibles complementarios como los RAC y el marabú presentaron comportamientos incluso superiores en cuanto a eficiencia energética-exergética que el bagazo, así como mezclas de estos combustibles.

Las prioridades generales obtenidas para los casos de estudios fueron calculadas. Para el caso de la tecnología Retal la mayor prioridad general correspondió a la variante V1, seguidamente las variantes V2 y V4. Similar comportamiento se obtuvo para la tecnología VU-40.

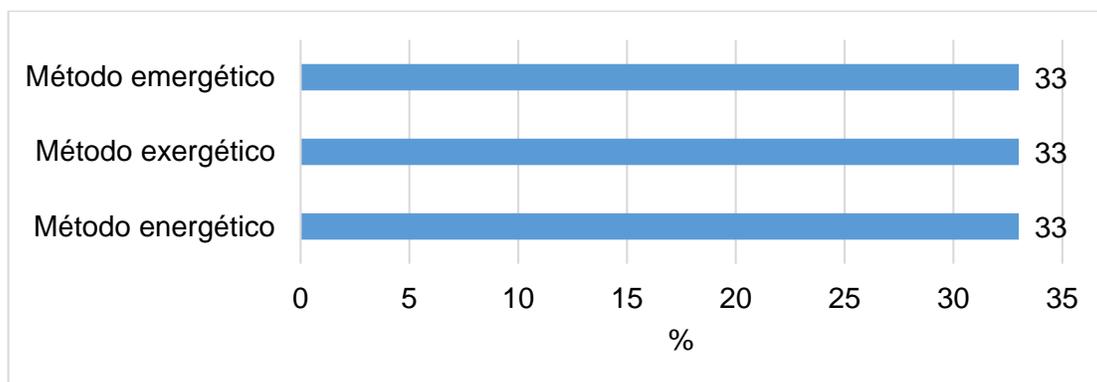
De acuerdo con las prioridades generales calculadas mediante la aplicación del método AHP, para ambos casos de estudio la alternativa de mayor sostenibilidad corresponde a la variante V1, los expertos tomaron como los indicadores de mayor influencia en esto los relacionados con la emergía como se explicó anteriormente debido al peso que juegan

dentro de la sostenibilidad de los sistemas y procesos. No obstante, dichos resultados representan que utilizar bagazo como combustible base en la generación mezclado con otro combustible adicional incorporan una oportunidad para la expansión de la industria azucarera actual.

Como en los problemas de toma de decisiones los juicios de los tomadores de decisiones en algunos casos pueden ser imprecisos, debido a que es relativamente difícil para estos proporcionar valores exactos a los criterios; es práctica común culminar con un análisis de sensibilidad de las alternativas.

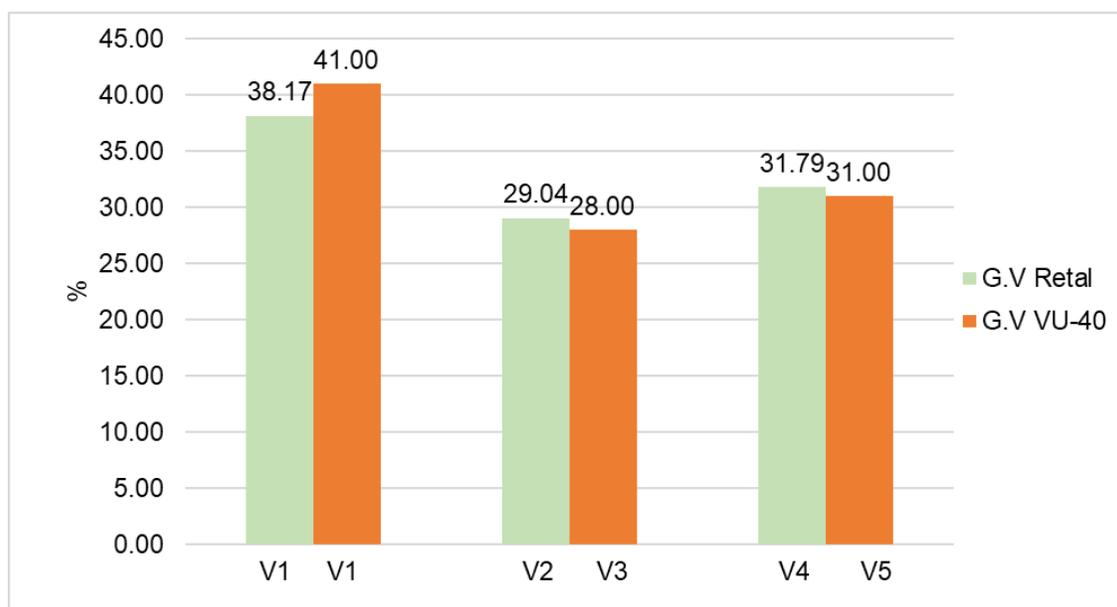
El análisis de sensibilidad es fundamental para observar cómo varían las clasificaciones generales de las alternativas de aprovechamiento de la biomasa con respecto a cambios en las prioridades de los criterios o subcriterios. Este análisis es muy utilizado en estudios que incluyen evaluación subjetiva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

Considerando un escenario de igual peso para ambos casos de estudio (33,3% para cada criterio o método, Figura 3.9), los resultados muestran que para el caso del G.V Retal la variante V1 tiene la puntuación más alta (38,17 %) entre todas las alternativas. La variante V4 tiene la segunda puntuación más alta (31,79 %), mientras que la alternativa V2 alcanza solo el 29,04 %, tal y como se muestra en la Figura 3.10. Dichos resultados para el caso de la tecnología VU-40 presentaron un comportamiento similar destacando el bagazo de caña como la alternativa más sostenible.



**Figura 3.9.** Ponderación para un escenario con pesos similares en cada método.

**Fuente:** (Elaboración propia)



**Figura 3.10** Análisis de sensibilidad para las variantes estudiadas considerando ambos casos de estudio. **Fuente:** (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos a partir de los casos de estudios evaluados pueden complementar las decisiones tomadas en los nuevos procesos inversionistas que se están haciendo en la industria azucarera y otras que involucren el empleo de la biomasa, como en las evaluaciones post, durante y después de los mismos, permitiendo comparar diferentes biomasa y tecnologías. Además, pueden ser utilizados como indicadores de desarrollo sostenible en los procesos de explotación de estas biomasa y otras FRE.

No obstante, consideramos que estas valoraciones pueden ser combinadas con otras reportadas por la literatura tales como los métodos económicos tradicionales, eco-costos, ACV, etc.

### 3.7 Conclusiones parciales

1. El método energético demostró, para todas las variantes un aumento de la eficiencia alrededor de un 5 %, en la tecnología VU-40 con respecto a la tecnología Retal. Existe un aumento de las eficiencias energéticas cuando se consideran los RAC de un 2,8 % o Marabú (5,3 %) en comparación con la variante V1, explicado fundamentalmente por el mayor valor calórico del combustible y otras causas posibles.

2. Mediante el estudio de la eficiencia exergética se determinó un aumento del 2% en ambas tecnologías para el caso de la variante V1 y se observa un incremento de la eficiencia en la variante V2 de un 5 % y en la variante V3 (5,6 %) sobre la variante V1. Los resultados obtenidos para el índice de sostenibilidad exergética se comportaron similar al indicador de la eficiencia exergética.
3. Se utilizó el método Aspen Plus para triangular los resultados de ambas eficiencias, lo que también permite la ampliación del estudio a un mayor número de variantes y en consecuencia también a otras tecnologías.
4. El método emergético evidenció resultados superiores para la tecnología VU-40 sobre la tecnología Retal debido a un mayor aprovechamiento del combustible. Para el caso de la variante V1 existe un aumento de un 7 % en la razón de renovabilidad, y un 11,07 % en el índice de sostenibilidad. Esto está dado a que se produce mayor energía por unidad de carga ambiental.
5. En el análisis multicriterio los expertos consideran de mayor importancia los criterios emergéticos (53,9 %), debido a una mayor relación directa de los mismos con la sostenibilidad de los procesos.
6. 5. El análisis sensitivo demostró que considerando el escenario de evaluación más consecuente se alcanzó el mismo orden en la clasificación general de las alternativas que para la evaluación realizada por los expertos, por lo que se aprecia la coherencia y la solidez de los resultados.
7. Los resultados obtenidos pueden ser tomados en cuenta tanto para ayudar a los procesos inversionistas o de operación en los casos de estudio evaluados.

## **CONCLUSIONES**

## **CONCLUSIONES GENERALES**

1. La revisión bibliográfica demostró que los métodos energéticos y exergéticos son ampliamente usados para la evaluación del uso de la biomasa como combustible en la industria azucarera, no siendo así con el método emergético, no encontrándose tampoco reportes de integración de estos métodos. En el caso cubano no existe una metodología que evalúe de manera integral la sostenibilidad energética en el aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera.
2. Se propone una metodología no reportada en la literatura que integra los métodos energético-exergético-emergético para el aprovechamiento de la biomasa como combustible en la industria azucarera. Dicha metodología agrupada en tres etapas permite el desarrollo de cada método y su integración, mediante la aplicación multicriterial, posibilita un mayor alcance hacia la sostenibilidad energética y propicia mejor toma de decisiones tanto para los procesos inversionistas como los operacionales.
3. Los expertos seleccionados consideraron, para los estudios de casos evaluados como significativos dos indicadores de energía, dos de exergía y siete indicadores de emergía, los cuales responden a tres indicadores económicos, cinco ambientales y tres indicadores sociales.
4. El análisis multicriterio en los casos de estudios evaluados en cuanto a las prioridades generales demostraron que la variante V1 fueron más satisfactorios en cuanto a la sostenibilidad que los obtenidos por las restantes variantes, representando estos el 45 % y 53 % respectivamente. Ello está dado por los costos adicionales económicos y ambientales que trae el empleo de los RAC y el Marabú.

## **RECOMENDACIONES**

## **RECOMENDACIONES**

1. Aplicar esta metodología a los procesos inversionistas y de operación de las diferentes posibilidades de tecnologías y combustibles que se utilizan y utilizarán en la industria azucarera cubana o en otras industrias que usen biomasa como combustible.
2. Poner estos resultados a disposición del grupo de trabajo gubernamental que estudia las potencialidades futuras de la biomasa, para su aprovechamiento como fuente renovable de energía.
3. Usar esta metodología como complemento de otras empleadas tradicionalmente para la toma de decisiones en el uso de biomasa tales como análisis económicos tradicionales, análisis de ciclo de vida, la huella ecológica corporativa, eco-costos etc.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, A. M., Hassan, T. H., & Mansour, M. E. (2018). Performance of wet and dry bagasse combustion in assalaya sugar factory-Sudan. *Innovative Energy & Research*, 7(1), 179.
- Abreu Elizundia, H., González Cortés, M., Rico Ramírez, O., Morales Zamora, M., & Espinosa Pedraja, R. (2018). Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar. *Centro Azúcar*, 43(1), 87-98.
- Acuña, V., & Abanto, L. (2017). Predecir mediante el análisis exergético la tecnología adecuada de cogeneración para la optimización de la Planta Azucarera San Jacinto.
- Agostinho, F., & Ortega, E. (2013). Energetic-environmental assessment of a scenario for Brazilian cellulosic ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 47, 474-489.
- Aguilar Rivera, N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova scientia*, 6(12), 125-161.
- Aguilar-Rivera, N., Alejandre-Rosas, J., & Espinosa-López, R. (2015). Evaluación emergy Y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.001>
- Ahrenfeldt, J., Thomsen, T. P., Henriksen, U., & Clausen, L. R. (2013). Biomass gasification cogeneration—A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 50(2), 1407-1417.
- Ali, S., Stewart, R., Sahin, O. & Silva-Vieira, A. (2023). Integrated GIS-AHP-based approach for off-river pumped hydro energy storage site selection. *Applied Energy*, 337(2023). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120914>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006>
- Álvarez, S., Lomas, P. L., Martín, B., Rodríguez, M., & Montes, C. (2006). La Síntesis Emergética ("Emergy Synthesis"): Integrando energía, ecología y economía. *Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales*, 2.
- Amaya, D. S. (2014). Análisis y optimización exergética de una planta de cogeneración para la industria azucarera Universidad Tecnológica de Pereira. *Facultad de Ingeniería Mecánica* ].
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.001>

- Ameri, M., Ahmadi, P., & Hamidi, A. (2009). Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study. *International Journal of energy research*, 33(5), 499-512.
- Ameri, M., Ahmadi, P., & Khanmohammadi, S. (2008). Exergy analysis of a 420 MW combined cycle power plant. *International Journal of energy research*, 32(2), 175-183.
- Amponsah, N., Hanlon, E., Izursa, J., & Capece, J. (2014). Sugarcane biomass production in south Florida: a comparative emergy assessment of organic soil and mineral soil production systems. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2(4), 302-314.
- Balta, M.T., Hepbasli, A. and Dincer, I. (2010) Thermodynamic Performance Comparison of Some Renewable and Non-Renewable Hydrogen Production Processes. *Proceedings of the WHEC*, May 16.-21. 2010, Essen, ISBN: 978-3-89336-652-1
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. y Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82, 1451-1463.
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H., & Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel☆. *Fuel*, 82(12), 1451-1463.
- Borges, R. J., López, A. V., Marcos, D. D., & Rabassa, D. R. (2020). Análisis emergético para la combustión de bagazo en un central azucarero. *Revista Cubana de Ingeniería*, 11(3), 43-53.
- Brosowski, A., Thrän, D., Mantau, U., Mahro, B., Erdmann, G., Adler, P., . . . Blanke, C. (2016). A review of biomass potential and current utilisation—Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany. *Biomass and Bioenergy*, 95, 257-272.
- Brown, M. T. y U., S. (2004). *Emergy Analysis and Environmental Accounting*. In C. Cleveland (Ed.). Oxford (United Kingdom): Elsevier, 329-354.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Energy quality, emergy, and transformity: HT Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 201-213.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2010). Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling*, 221(20), 2501-2508.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2011). Can emergy sustainability index be improved? A response to Harizaj. *Ecological Modelling*, 12(222), 2034-2035.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (1997). Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological engineering*, 9(1-2), 51-69.
- Buitrago Coca, A., & Pinto Baquero, P. C. (2015). Determinación de indicador integrado de desarrollo sostenible y biograma para el aprovechamiento actual del bagazo de caña de azúcar en el Valle de Cauca.

- Cadham, W., Van Dyk, J. S., Kumar, J. L., & Saddler, J. N. (2016). Challenges and opportunities for the conversion technologies used to make forest bioenergy. *Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes*, 102-126.
- Cano, N. A., Céspedes-Zuluaga, S., Guerrero-Martin, C., & Gallego, D. (2022). Exergy and energy: complementary tools for assessing the environmental sustainability use of biosolids generated in wastewater-treatment plant for energy-production. *Química Nova*, 45, 4-15.
- Cano-Estrella, O., López-Sánchez, O., Guerrero-Posada, P. A., & San José-González, P. (2022). Evaluación de la calidad de triturado del marabú cortado con una cosechadora forestal. *Ingeniería Agrícola*, 12(4).
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, 28(1), 35-51.
- Cavalcanti, E. J., Carvalho, M., & da Silva, D. R. (2020). Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy conversion and management*, 222, 113232.
- Chang, N.-B., & Pires, A. (2015). Sustainable Solid Waste Management: A Systems Engineering Approach. In M. Zhou (Series Ed.) *IEEE Series on Systems Science and Engineering*
- Chan, W. P., Veksha, A., Lei, J., Oh, W.-D., Dou, X., Giannis, A., . . . Lim, T.-T. (2019). A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste. *Applied Energy*, 237, 227-240.
- Chen, Z., Wang, M., Ren, Y., Jiang, E., Jiang, Y., & Li, W. (2018). Biomass torrefaction: A promising pretreatment technology for biomass utilization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,
- Choudhary, P., Assemany, P. P., Naaz, F., Bhattacharya, A., de Siqueira Castro, J., do Couto Couto, E. d. A., . . . Malik, A. (2020). A review of biochemical and thermochemical energy conversion routes of wastewater grown algal biomass. *Science of The Total Environment*, 726, 137961.
- Cimini, S., Prisciandaro, M., & Barba, D. (2005). Simulation of a waste incineration process with flue-gas cleaning and heat recovery sections using Aspen Plus. *Waste Management*, 25(2), 171-175.
- Ciro Redondo Biomass Power (2021). Generation Project. Technical and Functional Specification
- Connelly, L., Koshland, C.P. (1997). Two aspects of consumption: using an exergy-based measure of degradation to advance the theory and implementation of industrial ecology *Resources, Conservation and Recycling Vol 19 Issue 3* 199-217
- Cortés, M. (2011). *Modelación Matemática Aplicada*. UNIDEC. Rio Bamba. Ecuador.
- Cortés Falcón, M., Cornes Izquierdo, Y., Alomá Vicente, I., & González Suárez, E. (2019). Evaluación del sistema energético en el central azucarero Quintín Bandera. *Centro azúcar*, 46(3), 66-78.

- 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. [10.1016/j.renene.2010.07.031](https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031)
- Cruz, M., Franck Colombres, F. J., Golato, M. A., Morales, W. D., & Paz, D. (2013). Mejora en la eficiencia de calderas bagaceras de alta presión en la Argentina, mediante secado de bagazo. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 90(2), 7-16.
- Cuba, P. y. G. d. (2023). Transición Energética de Cuba: donde lo urgente y lo estratégico se unen. <https://www.presidencia.gob.cu/es/noticias/transicion-energetica-de-cuba-donde-lo-urgente-y-lo-estrategico-se-unen/>
- Daniel, J., Vishal, N. V., Albert, B., & Selvarsan, I. (2010). Evaluation of the significant renewable energy resources in India using Analytical Hierarchy Process. In *Multiple criteria decision making for sustainable energy and transportation systems* (pp. 13-26). Springer.
- Darmawan, A., Hardi, F., Yoshikawa, K., Aziz, M., & Tokimatsu, K. (2017). Enhanced process Integration of entrained flow gasification and combined cycle: modeling and simulation using Aspen Plus. *Energy Procedia*, 105, 303-308.
- de Cárdenas, L. Z., Ones, O. P., Ramos, P. A. R., De Cárdenas, B. M. Z., & Lombardi, G. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(3), 8.
- de Janeiro, R. (1992). La declaración del Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Río de Janeiro República Federativa del Brasil., aprobada en Estocolmo el, 16.
- de Souza-Santos, M. L. (2010). *Solid fuels combustion and gasification: modeling, simulation*. CRC Press.
- Dedeurwaerdere, T. (2013). Transdisciplinary sustainability science at higher education institutions: science policy tools for incremental institutional change. *Sustainability*, 5(9), 3783-3801.
- Dennis, S. (2019). Energy and Exergy Analysis of Vallumbra Sugar Mill. *Energy*, 5(11).
- Dincer, R., & Escárcega Castellanos, S. (2009). Desarrollo sustentable oportunidad para la vida. In: *Mc Graw Hill educación*.
- Dincer, I., y Rosen, M. A. (2013). Chemical Exergy. *Exergy*, (June), 31–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00003-6>
- Dolf Gielen, F. B., Deger Saygin, Morgan D. Bazilian, Nicholas Wagner, Ricardo Gorini. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24(2019), 38–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Dornburg, V., & Faaij, A. P. (2001). Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 91-108.
- Echeverry Arbeláez, A. (2017). Análisis exérgico y termoecológico de una caldera acuotubular de bagazo y carbón en un ingenio azucarero del Valle del Cauca.

- Falcón Roque, E. J. (2018). Desarrollo de un modelo de planificación energética sostenible usando técnicas de optimización multicriterio: una aplicación a la provincia de Cajamarca, Perú [ETSI\_Mon\_fos].
- Fals Acuña, M. M., Loret de Mola López, M. A., & Alonso Cervantes, D. (2010). Análisis exergoeconómico de la planta de cogeneración de la empresa azucarera "Carlos Manuel de Céspedes". *Centro azúcar*, 37(3), 11-17.
- 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.
- Flores, R., Muñoz-Ledo, R., Flores, B. B., & Cano, K. I. (2008). Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio. *Revista mexicana de ingeniería química*, 7(1), 35-39.
- Franck Colombres, F. J., Golato, M. A., Morales, W. D., Cruz, C., & Paz, D. (2011). Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 88(2), 41-49.
- Garcés Paz, R. V., & Martínez Silva, S. V. (2007). Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda.
- Gerssen-Gondelach, S., Saygin, D., Wicke, B., Patel, M., & Faaij, A. (2014). Competing uses of biomass: assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 964-998.
- Gil, M. P., Moya, A. M. C., & Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222-231.
- Golato, M. A., Feijóo, E. A., Franck Colombres, F. J., Paz, D., & Cárdenas, G. J. (2017). Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 94(2), 21-31.
- Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A., & Paz, D. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 85(2), 17-31.
- González, D. (2017). Análisis de la sostenibilidad de la sustitución del carbón por biomasa en las centrales térmicas convencionales. (Tesis de Grado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria.
- González Echave, D. (2017). Análisis de la sostenibilidad de la sustitución del carbón por biomasa en las centrales térmicas convencionales.
- González, A. B. P. (2020). Transición de los Sistemas de Energía Eléctrica en América Latina y el Caribe (2007-2017): Diagnóstico y Alternativas Sistémicas. *enerLAC-Revista de Energía de Latioamérica y el Caribe*, IV (1).
- González, A. G. (2001). Análisis del ciclo de vida e internalización de costes medioambientales externos de una planta de cogeneración de motores alternativos de gas (Doctoral dissertation, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea).

- Gonzalez-Salazar, M. A., Venturini, M., Poganietz, W.-R., Finkenrath, M., & Spina, P. R. (2016). Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation. *Biomass and Bioenergy*, 88, 43-58.
- Gracia-Rojas, J. P. (2015). Desarrollo sostenible: origen, evolución y enfoques. Documento de docencia, (3).
- Guerra, J. P., Cardoso, F. H., Nogueira, A., & Kulay, L. (2020). Thermodynamic and Environmental Feasibility Analysis of Cogeneration Units Powered by Biomass with a View to Exporting Electricity. *Advances in energy research*.
- Guevara, D. V. S. O., Pérez, D. C. Q., Dewulf, D. J., & Díaz, D. P. R. (2008). Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético ambiental de estrategias energéticas. Procedimiento para la valoración de la sostenibilidad energético ambiental de estrategias energéticas.
- Haro Sanchez, R. M. (2019). Software libre para evaluar la sostenibilidad de la agroexportación peruana por el método emergético.
- Haydary, J. (2018). Aspen simulation of two-stage pyrolysis/gasification of carbon based solid waste. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1033-1038.
- Heat, B. C. (2007). Power catalog of technologies. US Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership.
- Hernández, B. (2018). Primera Feria Internacional "Energías Renovables Cuba 2018". In G. A. (AZCUBA) (Ed.).
- Hernández Sardiñas, A., González Morales, V. M., & Freide Orozco, M. L. (2017). Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de azúcar Antonio Sánchez. *Centro azúcar*, 44(4), 88-97.
- Hidalgo, D. B., & Guerra, Y. P. (2016). Eficiencia energética en la climatización de edificaciones. *Revista Publicando*, 3(8), 218-238.
- IRENA, R. E. S. (2020). International renewable energy agency. Abu Dhabi, 2020.
- Inoussah, M.M., Adolphe, M.I. and Daniel, L. (2017) Assessment of Sustainability Indicators of Thermoelectric Power Generation in Cameroon Using Exergetic Analysis Tools. *Energy and Power Engineering*, 9, 22-39. <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2017.91003>
- Izursa Azurduy, J. L. (2011). Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*, 46(2), 71-76.
- Jiménez Borges, R., López Bastida, E. J., Bravo Amarante, E., Álvarez González, A. L., & Hernández Nodarse, M. T. (2020). Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método AHP. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(1), 73-79.
- Kajikawa, Y. (2008). Research core and framework of sustainability science. *Sustainability Science*, 3, 215-239.
- Kamate, S., & Gangavati, P. (2009). Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. *Applied Thermal Engineering*, 29(5-6), 1187-1194.

- 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. 10.1016/j.energy.2010.02.051
- Khattak, S., Greenough, R., Sardeshpande, V., & Brown, N. (2018). Exergy analysis of a four pan jaggery making process. *Energy Reports*, 4, 470-477.
- Komiyama, H., & Takeuchi, K. (2006). Sustainability science: building a new discipline. *Sustainability science*, 1, 1-6.
- Koppejan, J., & Van Loo, S. (Eds.). (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- Korkeakoski, M., & Filgueiras Sainz de Rozas, M. L. (2022). Una mirada a la transición de la matriz energética cubana. *Ingeniería Energética*, 43(3), 40-47.
- Krishnamoorthy, G., & Wolf, C. (2015). Assessing the role of particles in radiative heat transfer during oxy-combustion of coal and biomass blends. *Journal of Combustion*, 2015.
- Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., ... & Thomas, C. J. (2012). Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability science*, 7, 25-43.
- Larsson, A., Kuba, M., Vilches, T. B., Seemann, M., Hofbauer, H., & Thunman, H. (2021). Steam gasification of biomass—Typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants. *Fuel Processing Technology*, 212, 106609.
- Leff, E. (2002). *Transición hacia el desarrollo sustentable, La: perspectivas de América Latina y el Caribe* (No. 6). Instituto Nacional de Ecología.
- Lei, K., Zhou, S., & Wang, Z. (2014). *Ecological emergy accounting for a limited system: General principles and a case study of Macao*. Springer Science & Business Media.
- León-Martínez, T. S., Dopico-Ramírez, D., Triana-Hernández, O., & Medina-Estevez, M. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 47(2), 13-22.
- Li, Y., Zhou, L., & Wang, R. (2017). Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1017-1030.
- Liaño Abascal, N., Guerra Rodríguez, L. E., Pérez Colas, M., & González Suárez, E. (2023). Pellets de bagazo de caña, una oportunidad energética. *Centro Azúcar*, 50(2).
- 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.*
- Lomas, P. L., Martín, B., Rodríguez, M., & Montes, C. (2005). La síntesis emergética (“Emergy synthesis”). *Integrando energía, ecología y economía*.
- López, M., & León, D. (2015). *Modelación matemática basada en análisis exergético de una caldera bagacera Universidad Autónoma de Occidente*].
- Machín-Armas, F. O., & Fernández-Santiesteban, E. (2015). Sostenibilidad de la agroindustria azucarera cubana Y bioenergía. *Ciencia en su PC*(3), 85-101.

- Malico, I., Pereira, R. N., Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. (2019). Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 960-977.
- Mandade, P., Bakshi, B. R., & Yadav, G. (2016). Ethanol from Indian agro-industrial lignocellulosic biomass: an energy evaluation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(8), 2625-2634.
- Marinakis, V., Doukas, H., Xidonas, P., & Zopounidis, C. (2017). Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. *Omega*, 69, 1-16.
- Martínez, A., Valero, S., & Senabre, C. (2018). Estado del arte de modelos y metodologías de indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad energética de las naciones. *Técnica industrial*.
- Mbohwa, C. (2006). Modelling bagasse electricity generation: an application to the sugar industry in Zimbabwe. *Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology*,
- Meirea Cartea, P. Á. (2015). De los Objetivos de Desarrollo del Milenio a los Objetivos para el Desarrollo Sostenible: el rol socialmente controvertido de la educación ambiental. *Educación social: Revista de intervención socioeducativa*.
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galáan-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
- Mesa, Y. M., Correa, A. G., Valdés, R. G., Alarcón, F. M., & Camacho, M. R. (2008). Evaluación económico-energética de la recogida y transportación de los residuos agrícolas cañeros (RAC). Estudio de caso Empresa Azucarera «Héctor Molina Riaño». *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(2), 19-23.
- 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*, 95, 436-448.
- MINEM. (2018). Programa Energético Renovable en Cuba. In MINEM (Ed.).
- MINEM. (2023). Analizan propuesta de Política para la transición energética de Cuba. <https://www.minem.gob.cu/es/noticias/minem/analizan-propuesta-de-politica-para-la-transicion-energetica-de-cuba-video>
- Mokarrama, M., Jafar, M., Gitizadeh, M., Niknam, Taher. & Aghaei, J. (2020). A novel optimal placing of solar farms utilizing multi-criteria decisionmaking (MCDM) and feature selection. *Cleaner Production*, 261(2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121098>
- Montes, C. (2007). Del desarrollo sostenible a los servicios de los ecosistemas. *Ecosistemas*, 16(3).
- Motta, I. L., Miranda, N. T., Maciel Filho, R., & Maciel, M. R. W. (2019). Sugarcane bagasse gasification: Simulation and analysis of different operating parameters, fluidizing media, and gasifier types. *Biomass and Bioenergy*, 122, 433-445.

- Muneepeerakul, R., & Castillo-Chavez, C. (2015). Towards a Quantitative Science of Sustainability. *Bulletin of mathematical biology*, 77, 254-258.
- Muñoz, M. (2017). Producción de pellets combustibles a partir de residuos agrícolas de la cosecha de la caña de azúcar.
- Nadizadeh, S. & Nematollahi, O. (2021). Potential assessment of multi-renewable energy farms establishment using spatial multi-criteria decision analysis: A case study and mapping in Iran. *Cleaner Production*, 295(126318). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clepro.2021.126318>
- Naredo, J. M. (1994). Fundamentos de la economía ecológica. De la economía ambiental a la economía ecológica, 373-399.
- Niu, M., Xie, J., Liang, S., Liu, L., Wang, L., & Peng, Y. (2021). Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 22356-22367.
- Nussbaumer, T. (2010). Overview on technologies for biomass combustion and emission levels of particulate matter. Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), Zürich, Switzerland.
- Odum, H. T. (1973). Energy, ecology, and economics. *Ambio*, 220-227.
- Odum, H. T. (1996). Scales of ecological engineering. In (Vol. 6, pp. 7-19): Elsevier.
- Ong'iro, A., Ugursal, V. I., Al Taweel, A., & Lajeunesse, G. (1996). Thermodynamic simulation and evaluation of a steam CHP plant using ASPEN Plus. *Applied Thermal Engineering*, 16(3), 263-271.
- Orozco, N. V. B., & Díaz, E. A. (2014). Evaluación económica y social del uso del bagazo de caña en la generación de energía eléctrica en Nicaragua. *Tecnología en marcha*, 27(3), 107-121.
- Ozcan, M., Öztürk, S., & Oguz, Y. (2015). Potential evaluation of biomass-based energy sources for Turkey. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 178-184.
- Ozoegwu, C., Eze, C., Onwosi, C., Mgbemene, C., & Ozor, P. (2017). Biomass and bioenergy potential of cassava waste in Nigeria: Estimations based partly on rural-level garri processing case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 625-638.
- 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.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.07.014>
- Peterson, D., & Haase, S. (2009). Market assessment of biomass gasification and combustion technology for small-and medium-scale applications.

- Qazi, W. A., Abushammala, M. F., & 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.
- Quaak, P., Knoef, H., & Stassen, H. E. (1999). Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies.
- Quereshi, S., Jadhao, P. R., Pandey, A., Ahmad, E., & Pant, K. (2021). Overview of sustainable fuel and energy technologies. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook* (pp. 3-25). Elsevier.
- Quiroz, A. P. B., Coca, A. L. B., & Baquero, P. P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería solidaria*, 12(20), 133-149.
- Rahimi, M., Solaimani, K., Babaei, K., & Zandi, J. (2016). Site Selection of Suitable Areas for Artificial Groundwater Recharge Using Analytical Hierarchical Processing (AHP) in GIS: A Case Study: Dehgholan Plain. *International Bulletin of Water Resources and Development*, 3(4), 84-95.
- Raven, P. H. (2002). Science, sustainability, and the human prospect. *Science*, 297(5583), 954-958.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. 2. a edición. Berlín: Editorial Bartens.
- Ripoli, T. C., Molina Jr, W. F., Stupiello, J. P., Nogueira, M. C., & Saccomano, J. B. (1991). Potencial energético de residuos de cosecha de la caña verde. *Piracicaba: STAB*, 10, 22-26.
- Rodríguez Arias, A. D., Carrasco García, S. Y., López Bastida, E. J., & Jiménez Borges, R. (2019). Metodología para la evaluación del proceso de co/combustión de biomásas a partir de diferentes tecnologías en una caldera Retal. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(1), 295-302.
- Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. y Martínez P. B. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*. Editorial Academia
- Rodríguez, P. A., Lombardi, G., Ometto, A., Zumalacarreui, L. M., & Pérez, O. (2010). Potencialidades de generación de electricidad a partir de biomasa. *Scientia et Technica*, 16(45), 267-271.
- Rodríguez-Pérez, B., Contreras-Moya, A. M., & Rosa-Domínguez, E. (2014). Comparación ambiental de la generación de energía eléctrica a partir del bagazo y fuel oil. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 48(3), 70-79.
- Rubio González, A., & Clara, V. (2019). Estudio de la pérdida de calor por incombustión mecánica volátil en calderas RETAL, mediante simulación aerodinámica. *International Sugar Journal*.
- Rubio González, A., Iturria Quintero, P., Palmero Marín, D., & Viera Rodríguez, A. (2019). Propiedades del marabú. *Dichrostachys cinerea* (L.), como combustible, cosechado mediante máquinas.

- Rubio-González, A. (2015). Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación., Editorial Feijóo. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 75-103.
- Rubio-González, A. (2021) ¿Cómo acelerar e incrementar el empleo de fuentes renovables de energía en el proceso de transformación energética en Cuba?. Presentación al Consejo Nacional Innovador (CNI), La Habana, Cuba.
- Ruiz Restrepo, M. A. (2019). Bioenergía, una alternativa energética sustentable para Colombia. Aplicación del Concepto Integrado de Sostenibilidad (ICoS). Escuela de Economía.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). Diagnosis with dependent symptoms: Bayes theorem and the analytic hierarchy process. *Operations research*, 46(4), 491-502.
- 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*. Pitsburg: RWS Publications.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (pp. 23-40). Springer.
- Sabia, G., Heinze, C., Alobaid, F., Martelli, E., & Epple, B. (2019). ASPEN dynamics simulation for combined cycle power plant–Validation with hot start-up measurement. *Energy*, 187, 115897.
- Salisu, J., Gao, N., & Quan, C. (2021). Techno-economic assessment of co-gasification of rice husk and plastic waste as an off-grid power source for small scale rice milling-an Aspen Plus model. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105157.
- Sánchez Abreu, J. E. (2018). La industria azucarera importante fuente para la generación de electricidad en Cuba. *Caribeña de Ciencias Sociales*(junio).
- Sánchez, A. A., & Guerra, I. M. (2022). Las energías verdes. Análisis desde la revolución verde en Cuba. *European Journal of Social Law/Revue Européenne du Droit Social*, 57(4).
- 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.
- Schoolman, E. D., Guest, J. S., Bush, K. F., & Bell, A. R. (2012). How interdisciplinary is sustainability research? Analyzing the structure of an emerging scientific field. *Sustainability Science*, 7, 67-80.
- Seabra, J. E., & Macedo, I. C. (2011). Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. *Energy Policy*, 39(1), 421-428.
- Seçer, A., Küçet, N., Fakı, E., & Hasanoğlu, A. (2018). Comparison of co-gasification efficiencies of coal, lignocellulosic biomass and biomass hydrolysate for high yield hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21269-21278.
- Sen, A., Stiglitz, J., & Fitoussi, J. P. (2010). Mis-measuring our lives: why GDP doesn't add up? (No. hal-03415632).

- Sindhu, S. P., Nehra, V., & Luthra, S. (2016). Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process: Indian outlook. *Energy*, 100, 332-348.
- Singh, O. K. (2019). Exergy analysis of a grid-connected bagasse-based cogeneration plant of sugar factory and exhaust heat utilization for running a cold storage. *Renewable energy*, 143, 149-163.
- Solano, I., Aguilar, O., Domínguez, C., Ramírez, G., & Aguilar, O. A. (2020). Evaluación del rendimiento energético del bagazo de caña de un ingenio azucarero vs su aprovechamiento mediante gasificación. *Revista De Iniciación Científica*, 6(1), 30-35.
- Song, G., Shen, L., y Xiao, J. (2011). Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(16), 9758–9766. <https://doi.org/10.1021/ie200534n>
- Suzuki, K., Tsuji, N., Shirai, Y., Hassan, M. A., & Osaki, M. (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 97, 149-154.
- Szargut, J. (1999). Exergy in the Thermal Systems Analysis. In: Bejan A., Mamut E. (eds) *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*, 69. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4685-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4685-2_9)
- Terzi, R. (2018). Application of exergy analysis to energy systems. *Application of Exergy*, 109.
- Thomas, P., Soren, N., Rumjit, N. P., James, J. G., & Saravanakumar, M. (2017). Biomass resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 718-730.
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable energy*, 107, 235-244.
- Tungalag, A., Lee, B., Yadav, M., & Akande, O. (2020). Yield prediction of MSW gasification including minor species through ASPEN plus simulation. *Energy*, 198, 117296.
- Valdés, A. (2020). Metodología para el análisis multicriterio de los proyectos de inversión en la gestión de residuos industriales. (Tesis de Maestría). Universidad Carlos Rafael Rodríguez.
- Vávrová, K., Knápek, J., Weger, J., Králík, T., & Beranovský, J. (2018). Model for evaluation of locally available biomass competitiveness for decentralized space heating in villages and small towns. *Renewable energy*, 129, 853-865.
- Velásquez Arredondo, H. I. (2009). Avaliação exergética e exergo-ambiental da produção de biocombustíveis Universidade de São Paulo].
- Vigot, M. A., Damartzis, T., & Maréchal, F. (2018). Thermoeconomic design of biomass biochemical conversion technologies for advanced fuel, heat and power production. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 44, pp. 1801-1806). Elsevier.
- Vilches. (2022). Biomass plant 1X60 MW. Ficha técnica.
- Villar, J. (2010). Alimento animal y energía de la caña de azúcar. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43(1), 41-48.

- Viniegra, M. E. I., Davidsdottir, B., & Zurita, R. G. (2009). Índice de Sustentabilidad Energética: estimaciones para México. *Principios: estudios de economía política*, (15), 85-100.
- Vitória, E. L. d., & Rodrigues, J. P. (2016). Energy efficiency analysis of sugarcane as a raw material for ethanol production. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 616-623.
- Wang, J. P. (2015). La sostenibilidad energética.
- WCED, S. W. S. (1987). World commission on environment and development. *Our common future*, 17(1), 1-91.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.005>
- Yarime, M., Takeda, Y., & Kajikawa, Y. (2010). Towards institutional analysis of sustainability science: a quantitative examination of the patterns of research collaboration. *Sustainability Science*, 5, 115-125.

## **CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA DEL ASPIRANTE**

## **PUBLICACIONES, EVENTOS Y ASESORÍAS DE TESIS DE GRADO Y MAESTRÍA DEL AUTOR RELACIONADOS CON EL TEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **Publicaciones científicas**

Methodology for the evaluation of the process of co / combustion of biomasses from different technologies in a retal boiler. Revista Universidad y Sociedad, 11(1), 3-10. <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

Herramientas de economía ecológica para la evaluación de la sostenibilidad de biomásas. Fundación Universidad de América Revista de Investigación, vol. 12 No. 2 julio-diciembre de 2019 ISSN 2011-639x

Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método AHP. Jiménez Borges, R., López Bastida, E. J., Bravo Amarante, E., Andrés Lorenzo, A. G., & Hernández Nodarse, M. T. (2020). Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método ahp. Universidad y Sociedad, 12(1), 7379.

Análisis emergético para la combustión de bagazo en un central azucarero. Revista Cubana de Ingeniería Vol. XI (3) 43-53 (2020) ISSN: 2223-1781

Mejoras en el esquema tecnológico para lograr incrementos en la eficiencia energética en un central azucarero. Reinier Jiménez Borges, Andrés L Álvarez González, Ernesto M López Alemán, Junior Lorenzo Llanes. SciComm Report. Universidad Autónoma de Chile. Vol.1 No.1 <https://revistas.uautonoma.cl/index.php/scr/article/view/619>

Metodología para balance energético de un central azucarero. Estudio de Caso. CAI Ciudad Caracas. Revista Mapa, 2(20) 31-45. Iturralde, L. A., Jiménez Borges, R., Castro Perdomo, N. A. & Monteagudo Yanes, J. P. (2020) Metodología para balance energético de un Central Azucarero. Estudio de caso: Central "Ciudad Caracas". Revista Mapa, 2(21), 27-47. <http://revistamapa.org/index.php/es>

Análisis emergético para el aprovechamiento de biomásas en el proceso de combustión. ( III Simposio de Ciencias para el desarrollo Sostenible)

Jiménez Borges, R., Iturralde Carrera, L. Á., Monteagudo Yanes, J. P., & Castillo Alvarez, Y. (2021). Pérdidas por radiación en generadores de vapor con el apoyo de la técnica termográfica. Revista Universidad y Sociedad, 13(3), 262-270.

Application of the AHP and TOPSIS Method in the Combustion Process of a Steam Generator. 2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ECTM).

### **Eventos**

Trabajo aceptado a participar en a participar en la IV edición de la Conferencia Científica Internacional "YAYABOCIENCIA 2017", del 22 al 24 de noviembre. Evaluación preliminar del potencial de las diferentes biomásas de la provincia de Cienfuegos

Trabajo aceptado como cartel a participar en la en la 22 Conferencia de Química a celebrarse del 29 de noviembre al 1 de diciembre de 2017, en el Hotel Meliá Santiago.

Metodología para la estimación del potencial de biomasa en cienfuegos con fines energéticos

Participación en el 9<sup>no</sup> Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos 23-26 de Octubre con el trabajo titulado Metodología para el análisis energético, exergético y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía.

Participación como ponente del trabajo "Metodología para la combustión de la biomasa basada en costes físicos o energéticos". IV Taller de Alianzas Estratégicas para la Internacionalización de la Educación Superior. Cienfuegos 26 de octubre de 2018.

Participación como ponente en el evento provincial *Universidad 2020 12<sup>do</sup> Congreso Internacional de Educación Superior* con el trabajo "Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método AHP"

Trabajo aceptado para presentar en la III Conferencia Internacional "Energía, Innovación y Cambio Climático", a celebrarse en el Palacio de Convenciones, La Habana, del 14 al 16 de abril de 2020. "Evaluación de la sostenibilidad para la biomasa cañera a partir del método AHP".

Metodología para balance energético de un central azucarero. Estudio de Caso. CAI Ciudad Caracas. Taller Provincial Con Mas Ciencia co-auspiciado por la Empresa Azucarera. Celebrado en la Ciudad de Cienfuegos, Noviembre, 2020.

Metodología para el análisis energético, exergético y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía. Taller Provincial Con Mas Ciencia. co-auspiciado por la Empresa Azucarera Celebrado en la Ciudad de Cienfuegos, Noviembre, 2020.

Mejoras en el esquema tecnológico para lograr incrementos en la eficiencia energética de un central azucarero. III Encuentro Científico Nacional de Educación Ambiental y Desarrollo Sostenible 2020 (Aceptado a participar) 26-27 Enero 2021 ONLINE

Rendimiento energético y exergético para el aprovechamiento de biomazas en el proceso de combustión. Taller Regional de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. 19 de Mayo, 2021. Autores: Aliena de la Caridad Bermúdez Chou, Universidad de Cienfuegos, estudiante de 5to año de Ingeniería Mecánica. Reinier Jiménez Borges, Universidad de Cienfuegos, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).

Mención en el Evento Municipal Universidad 2022. Trabajo titulado: Rendimiento energético, exergético y energético para el aprovechamiento de biomazas en el proceso de combustión. Autores: MSc Reinier Jiménez Borges; Dr. C Eduardo J López Bastida; Dr. C Edelvy Bravo Amarante; Est: Aliena de la Caridad Bermúdez Chou

Trabajo aceptado a participar en la III Conferencia Científica Internacional (X Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente). Análisis comparativo de los potenciales impactos ambientales de esquemas de generación de electricidad en el territorio Cienfueguero. Autores: MSc. Reinier Jiménez Borges, MSc. Alejandro Valdés López, Dr.C Eduardo Julio López Bastida. Cienfuegos 26-29 octubre, 2021.

Trabajo aceptado a participar en la III Conferencia Científica Internacional (X Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente). Metodología para evaluar sostenibilidad en el proceso de combustión en la industria azucarera. Autores: MSc. Reinier Jiménez Borges, Dr.C Eduardo Julio López Bastida, Dr.C Edelvy Bravo Amarante, Est Aliena de la Caridad Bermúdez Chou, MS.c Yoisdell Castillo Alvarez. Cienfuegos 26-29 octubre, 2021

Trabajo aceptado a participar en: XIV evento VISIÓN 2021: La Universidad y su contribución al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Revisión a los impactos de la crisis sanitaria. *Metodología para evaluar sostenibilidad en el proceso de combustión en la industria azucarera*

Rendimiento energético-exergético para diferentes mezclas de biomásas en un generador de vapor. I Convención científica internacional de la universidad de cienfuegos. Xi taller internacional de energía, medio ambiente y desarrollo sostenible. Octubre 2022

#### Asesoría de Tesis de Grado y/o Tesis de Maestría

Simulación y análisis energético-exergético de una caldera RETAL mediante el software ASPEN PLUS. Autor: Osley Boza Carreiro. Tutor: MSc, Ing. Reinier Jiménez Borges; Dr.C Eduardo J López Bastida (Diciembre 2021)

Análisis energético-exergético aplicado a un generador de vapor de alta presión. Autor: Yuniel Delgado Santana. Tutor: MSc, Ing. Reinier Jiménez Borges; Dr.C Eduardo J López Bastida (Julio 2022)

Estudio comparativo para la combustión de biomásas en un generador de vapor. Autor: Liezer Arias Felipe. Tutor: MSc, Ing. Reinier Jiménez Borges; Dr.C Eduardo J López Bastida (Diciembre 2022)

Evaluación de la sostenibilidad de las diferentes biomásas para la producción de energía eléctrica en la Central Bioeléctrica Ciro Redondo. Autor: Frank D Rodríguez García. MSc, Ing. Reinier Jiménez Borges; Dr.C Eduardo J López Bastida (Diciembre 2022)

#### **Premios**

Premio Provincial del CITMA a la Investigación Científica al trabajo titulado "Metodología para la combustión de biomasa basada en costes físicos o energéticos". Dado a los 21 días del mes de marzo del 2019.

Premio Provincial del CITMA a la Investigación Científica al trabajo titulado "Mejoras en el esquema tecnológico para lograr Incrementos en la eficiencia energética del Central azucarero "Antonio Sánchez". Dado a los 28 días del mes de Mayo del 2021

## **ANEXOS**

## ANEXOS

**Anexo 1.** Requisitos que deben cumplir los criterios Chang y Pires (2015) para poder ser utilizados en el proceso de toma de decisiones:

- **Principio sistémico.** Los criterios relevantes deben reflejar las principales características del desempeño del sistema.
- **Principio de consistencia.** Los criterios deben ser compatibles con los objetivos de los decisores.
- **Principio de independencia.** Los criterios no deben tener una relación igual inclusiva con otros criterios del mismo nivel. Los criterios deben reflejar el rendimiento de las alternativas desde aspectos versátiles.
- **Principio de medición.** Los criterios deben ser medibles como valores cuantitativos si es posible o expresados cualitativamente.
- **Principio de comparabilidad.** Cuanto mayor sea la racionalidad mayor será la comparabilidad con los criterios pertinentes. Los criterios deben normalizarse para comparar u operar con criterios de beneficios y criterios de costos.

**Anexo 2.** Encuesta para la determinación de los coeficientes Kc y Ka.

Usted forma parte de los candidatos propuestos a expertos a seleccionar en el tema “Metodología para evaluar la sostenibilidad energética del aprovechamiento de biomasa como combustible en la industria azucarera”. Por ello es necesario de su autoevaluación para determinar su posibilidad de ser elegido. Se le solicita, por favor, tenga en consideración la importancia del tema y su papel en el proceso de decisión.

Nombre y Apellidos: \_\_\_\_\_

Categoría Científica: \_\_\_\_\_

Centro de trabajo: \_\_\_\_\_

Profesión: \_\_\_\_\_

Años de experiencia: \_\_\_\_\_

Marque con una cruz (X) en las tablas que se presentan a continuación el nivel de conocimiento que presenta sobre las temáticas citadas. Considere que la escala en la primera tabla se presenta en forma ascendente, es decir, el conocimiento sobre el tema va aumentando desde el 0 hasta el 10.

<b>Nivel de conocimiento que posee</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Proceso de aprovechamiento de biomasa cañera en una Caldera RETAL y Altos parámetros.											
Variables utilizadas para evaluar la sostenibilidad de la biomasa cañera como fuente de energía											
Métodos (energético, exergético y emergético)											
Toma de decisiones en la planificación energética											
Aplicación de métodos de decisión multicriterios											

	<b>Grado de influencia de cada una de las fuentes de argumentación</b>		
<b>Fuente de Argumentación</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>
Análisis realizados por usted			
Experiencia adquirida			
Trabajos de autores nacionales que conoce			

Trabajos de autores internacionales que conoce			
Conocimiento propio sobre el estado del tema			
Su intuición			

**Anexo 3.** Resultados de la autoevaluación de los candidatos considerados.

<b>Candidato</b>	<b><math>K_c</math></b>	<b><math>K_a</math></b>	<b><math>K</math></b>
1	0,9	0,9	0,9
2	0,86	0,8	0,83
3	0,92	0,8	0,86
4	0,84	0,9	0,87
5	0,8	0,7	0,75
6	0,76	0,8	0,78
7	0,84	0,9	0,87
8	0,78	0,9	0,84
9	0,84	0,7	0,77
10	0,8	0,9	0,85
11	0,8	0,8	0,8
12	1	1	1
13	0,84	0,8	0,82
14	0,74	0,8	0,77
15	0,9	1	0,95
16	0,7	0,8	0,75
17	0,74	0,9	0,82
18	0,88	0,9	0,89
19	0,82	0,8	0,81
20	0,96	0,9	0,93

**Anexo 4:** Posibles criterios y subcriterios a ser utilizados en la evaluación.

Criterios	Subcriterios
Económicos	Eficiencia Energética Eficiencia Exergética Materiales de la Economía Servicios de la Economía Costo de combustible Costo de electricidad Valor neto actual Vida útil Costo anual equivalente
Ambientales	Pérdidas de Energía Eficiencia Energética Eficiencia Exergética Índice de sostenibilidad exergética Razón de renovabilidad (Em1) Índice de sostenibilidad (Em2) Razón de carga ambiental (Em3) Eficiencia emergética(Em4) Emisión de CO <sub>2</sub> Emisión de partículas Compuesto volátiles <i>non-methane</i> Terreno utilizado Ruido
Sociales	Materiales de la Economía Servicios de la Economía Creación de empleos Beneficios sociales Labor humana

**Anexo 5:** Encuesta para la aplicación del método Delphi para la evaluación de los subcriterios.

Estimado(a) experto(a), usted ha sido seleccionado por sus conocimientos y experiencia para evaluar con base la sostenibilidad energética del aprovechamiento de biomasa como combustible en la industria azucarera. Para ello se necesita de su colaboración en la evaluación del nivel de importancia que usted le confiere a los subcriterios, presentados en el Anexo 4 y los clasifique de acuerdo con el formato de la siguiente tabla, para alcanzar el objetivo propuesto. Se le solicita, por favor, tenga en consideración la importancia del tema y su papel en el proceso de decisión.

Rogamos que evalúe cada subcriterio mediante la escala de Liker, colocando una cruz en la valoración que usted estime pertinente:

Agradecemos de antemano por su colaboración. Reciba un cordial saludo.

**Anexo 6:** Desarrollo del método Delphi de evaluación de criterios utilizando el *software*:

Subcriterios	Sin importancia	Poco importante	Moderadamente importante	Importante	Muy importante
--------------	-----------------	-----------------	--------------------------	------------	----------------

Método de Consulta a Expertos.v1.0.

Valoración de los aspectos a evaluar

Acciones Idioma Ayuda

Método Delphi

Frecuencia Observada

Aspectos a evaluar	Inadecuado	Poco adecuado	Adecuado	Bastante adecuado	Muy adecuado
E1	0	2	7	6	0
E2	1	3	5	6	0
En1	0	2	5	7	1
En2	0	1	4	9	1
En3	0	2	7	6	0
Ex1	0	0	7	7	1

Nombre del aspecto a evaluar I PA A BA MA

Frecuencia Acumulativa

Aspectos a evaluar	Inadecuado	Poco adecuado	Adecuado	Bastante adecuado	Muy adecuado
E1	0	2	9	15	15
E2	1	4	9	15	15
En1	0	2	7	14	15
En2	0	1	5	14	15
En3	0	2	9	15	15
Ex1	0	0	7	14	15

Aspectos : 11

Valoración de los aspectos a evaluar

Acciones Idioma Ayuda

### Frecuencia Acumulativa Relativa

Aspectos a evaluar	Inadecuado	Poco adecuado	Adecuado	Bastante adecuado
E1	0	0,133333340287209	0,600000023841858	1
E2	1	0,266666680574417	0,600000023841858	1
En1	0	0,133333340287209	0,466666668653488	0,933333337306976
En2	0	0,0666666701436043	0,333333343267441	0,933333337306976
En3	0	0,133333340287209	0,600000023841858	1
Ex1	0	0	0,466666668653488	0,933333337306976

### Distribución Normal Inversa correspondiente a cada Frecuencia Acumulativa Relativa

Aspectos a evaluar	Inadecuado	Poco adecuado	Adecuado	Bastante adecuado
E1	-3,09	-1,11077158510774	0,253347164571708	3,09
E2	3,09	-0,622925681315446	0,253347164571708	3,09
En1	-3,09	-1,11077158510774	-0,0836517289646521	1,50108597811867
En2	-3,09	-1,50108592049924	-0,430727272073484	1,50108597811867
En3	-3,09	-1,11077158510774	0,253347164571708	3,09

←                  →

Calcula la Frecuencia Acumulativa Relativa y la Distribución Normal Inversa. Aspectos : 11

Valoración de los aspectos a evaluar

Acciones Idioma Ayuda

### Evaluación de los aspectos

C1 -1,96636363636364	C2 -1,89297041392801	C3 -0,217520737288713	C4 1,6554092425976	No. de aspectos a evaluar : 11 Sumatoria del No. de aspectos : -26,6359009948103
-------------------------	-------------------------	--------------------------	-----------------------	---

Aspectos a evaluar	N-P	Aspectos a evaluar	Promedio por aspectos
E1	-0,269933003862543	E1	-0,214356105134008
E2	-1,93689447981062	E2	1,45260537081407
En1	0,211545224991879	En1	-0,69583433398843
En2	0,395892694616963	En2	-0,880181803613514
En3	-0,269933003862543	En3	-0,214356105134008

Inadecuado
S1

Poco Adecuado
E2

Adecuado
E1
En3

Bastante Adecuado
En1
En2
Ex1

Muy Adecuado
Em2

CONCLUSIONES

←      →

**Anexo 7.** Poder Calorífico Inferior de los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

<b>Variantes</b>	<b>Poder calórico inferior (kJ/kg)</b>
I (100 % Bagazo)	7 360,4
II (100 % RAC)	13 169,97
III (100 % Marabú)	13 821,05
IV (50 % Bagazo, 50 % RAC)	10 265,185
V (90 % Bagazo, 10 % Marabú)	8 006,47
VI (90 % RAC, 10 % Marabú)	13 235,08

**Anexo 8.** Entalpías específicas de los productos de la combustión y el aire en (kJ/kg).  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Productos de la combustión</b>	<b>kJ/kg</b>
(c $\vartheta$ ) RO <sub>2</sub>	319,25
(c $\vartheta$ ) N <sub>2</sub>	233,20
(c $\vartheta$ ) H <sub>2</sub> O	272,26
(c $\vartheta$ ) Aire	240,38
(c $\vartheta$ ) Ceniza	151,66

**Anexo 9.** Entalpías para las diferentes variantes de combustible (kJ/kg). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variantes</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
<b>Entalpía de los gases de salida (I<sub>gs</sub>)</b>	1 324,14	1 878,19	1 601,17	1 361,32	1 875,43
<b>Entalpía del volumen teórico de aire frío a la</b>	84,44	133,16	108,80	89,44	133,29

<b>temperatura de 303,15 K (I<sup>o</sup><sub>af</sub>)</b>					
<b>Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión (I<sup>o</sup><sub>g</sub>)</b>	804,92	1 059,36	932,14	826,83	1 055,83
<b>Entalpía del aire en exceso (I<sup>a</sup><sub>exc</sub>)</b>	509,99	804,25	657,12	524,70	805,01
<b>Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso (I<sub>ΔH2O</sub>)</b>	9,24	14,57	11,91	9,79	14,59
<b>Entalpía del volumen teórico de aire necesario (I<sup>o</sup><sub>a</sub>)</b>	509,99	804,25	657,12	540,17	805,01

**Anexo 10.** Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

<b>Combustibles (Variantes)</b>	<b>Volúmenes teóricos de los combustibles (m<sup>3</sup>N/kg)</b>			
	<b>V<sup>o</sup>RO<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>N<sub>2</sub></b>	<b>V<sup>o</sup>H<sub>2</sub>O</b>	<b>V<sup>o</sup>a</b>
I (100 % Bagazo)	0,44	1,68	1,01	2,12
II (100 % RAC)	0,69	2,64	0,81	3,35
III (50 % Bagazo, 50 % RAC)	0,57	2,16	0,91	2,73.
IV (90 % Bagazo, 10 % Marabú)	0,48	1,78	0,95	2,25
V (90% RAC, 10% Marabú)	0,71	2,65	0,77	3,35

**Anexo 11.** Pérdidas en el proceso de la combustión para las diferentes variantes de combustibles (%). Fuente: Elaboración propia.

<b>Pérdidas</b>	<b>Variantes I-V</b>
<b>q<sub>3</sub></b>	0,1
<b>q<sub>4</sub></b>	2
<b>q<sub>5</sub></b>	0,7

**Anexo 12.** Determinación de la masa de trabajo

	Bagazo	RAC	Marabú	Bagazo/RAC	Bagazo/Marabú	RAC/Marabú
Calor disponible (Qd) [kJ/kg]	7 360,4	13 169,97	13 821,05	10 265,18	8 006,46	13 235,07
Volumen Teórico de aire (Va <sup>0</sup> )	2,12	3,34	3,37	2,73	2,24	3,34
Volumen real de aire (Va)	3,81	6,02	6,07	4,92	4,04	6,02
Flujo Volumétrico de aire	314 290,97	495 638,05	500 326,16	404 964,51	332 894,49	496 106,86
Flujo másico de aire	408 578,26	594 765,66	600 391,39	501 671,96	427 759,57	595 328,23
Flujo másico de aire [kg/año] x10 <sup>6</sup>	1 144	1 665	1 681	1 404	1 197	1 666

**Anexo 13.** Entalpías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados de las tablas de vapor.

<b>Entalpías (kJ/kg)</b>	
<b>Entalpía del agua alimentar (h<sub>aa</sub>)</b>	579,73
<b>Entalpía a las condiciones de referencia de 303 K (h<sub>o</sub>)</b>	125,73
<b>Entalpía del vapor saturado (l<sub>vs</sub>)</b>	2 757,56

<b>Entalpía (100 % Bagazo)</b>	7 360,95
<b>Entalpía (100 % RAC)</b>	13 169,97
<b>Entalpía (50 % Bagazo, 50 % RAC)</b>	10 265,19
<b>Entalpía (90 % Bagazo, 10 % Marabú)</b>	8 006,47
<b>Entalpía (90 % RAC, 10 % Marabú)</b>	13 235,08

**Anexo 14.** Entropías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados de las tablas de vapor.

<b>Entropías (kJ/kg K)</b>	
<b>Entropía del agua de alimentar (<math>S_{aa}</math>)</b>	1,72
<b>Entropía a las condiciones de referencia de 303 K (<math>S_o</math>)</b>	0,44
<b>Entropía del vapor saturado (<math>S_{vs}</math>)</b>	6,75

**Anexo 15.** Condiciones de los gases de escape. Fuente: Elaboración propia.

<b>Variantes</b>	I	II	III	IV	V
<b>Densidad de los gases de escape (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,20	0,14	0,27	0,31	0,26
<b>Volumen específico de los gases de escape (m<sup>3</sup>/kg)</b>	4,80	6,78	3,63	3,20	3,83
<b>Calor específico de los gases de escape (kJ/kg K)</b>	0,99				

**Anexo 16.** Exergías específicas en kJ/kg. Fuente: Elaboración propia.

<b>Agua de alimentar (<math>e_{aa}</math>)</b>	66,07
<b>Gases de escape (<math>m_{ge}</math>)</b>	82 300,00
<b>Vapor saturado (<math>e_{vs}</math>)</b>	718,52

**Anexo 17.** Exergía en kW de entrada y salida del sistema para la Variante I (100 % Bagazo). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variante I (100 % Bagazo)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	3 913,1
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	3 407,9
<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	42 552,3
<b>Exergía combustible</b>	168 266,9

**Anexo 18.** Exergía en kW de entrada y salida del sistema para la Variante II (100 % RAC). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variante II (100 % RAC)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	3 913,1
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	3 407,9
<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	42 552,3
<b>Exergía combustible</b>	301 080,1

**Anexo 19.** Exergía en kW de entrada y salida del sistema para la Variante III (50 % Bagazo, 50 % RAC). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variante III (50 % Bagazo, 50 % RAC)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	3 913,1
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	3 407,9
<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	42 552,3
<b>Exergía combustible</b>	234 673,5

**Anexo 20.** Exergía en kW de entrada y salida del sistema para la Variante IV (90 % Bagazo, 10 % Marabú). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variante IV (90 % Bagazo, 10 % Marabú)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	3 913,1
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	3 407,9
<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	42 552,3
<b>Exergía combustible</b>	183 036,7

**Anexo 21.** Exergía en kW de entrada y salida del sistema para la Variante V (90 % RAC, 10 % Marabú). Fuente: Elaboración propia.

<b>Variante V (90 % RAC, 10 % Marabú)</b>	
<b>Exergía del agua alimentar (<math>E_{aa}</math>)</b>	3 913,1
<b>Exergía de los gases de escape (<math>E_{ge}</math>)</b>	3 407,9

<b>Exergía del vapor producido por la caldera (<math>E_{vs}</math>)</b>	42 552,3
<b>Exergía combustible</b>	302 568,6

**Anexo 22.** Datos de la tecnología VU-40 y datasheet de diseño para el balance energético por el método analítico.

Datos de Tecnología	G.V VU-40
Presión [MPa]	6,2
Temperatura [K]	728,6
Producción de Vapor ( $D_v$ ) [kg/s]	59,2
Temperatura agua alimentar ( $T_{aa}$ ) [K]	410,95
Consumo de combustible para el bagazo y RAC ( $B_c$ ) [kg/s]	22,86
Consumo de bagazo para 50% [kg/s]	11,43
Consumo de RAC para 50% [kg/s]	11,43
Consumo de bagazo para 90% [kg/s]	20,56
Consumo de marabú para 10% [kg/s]	2,29
Consumo de RAC para 90% [kg/s]	20,58
Consumo de marabú para 10% [kg/s]	2,29
Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera ( $\alpha$ )	2
Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno ( $\alpha_{Ht}$ )	1.8
Temperatura de salida de los gases ( $T_{gs}$ ) [K]	452,5

53C-10218  
Rev.0**DESIGN SUMMARY**

Number of units:	One (1)
Designation:	VU-40 CR
Fuels:	Biomass and natural gas
Location:	Indoors
Site elevation above sea level:	1,110 ft

**DESIGN CONDITIONS:**

Normal continuous capacity	lb/h	470,000
Maximum continuous capacity	lb/h	470,000
Design pressure	psig	1,156
Operating pressure	psig	900
Total steam temperature	°F	850
Feedwater temperature	°F	280
Ambient air temperature	°F	78.8

**HEATING SURFACE**

Furnace (ABMA)	ft <sup>2</sup>	6,905
Superheaters	ft <sup>2</sup>	14,426
Boiler bank	ft <sup>2</sup>	23,587
Economizer	ft <sup>2</sup>	14,099
Tubular air heater	ft <sup>2</sup>	114,089

FURNACE VOLUME	ft <sup>3</sup>	45,529
----------------	-----------------	--------

**FURNACE DIMENSIONS**

Furnace width	ft	35.00
Furnace depth	ft	26.00
Average furnace height	ft	54.19

**Anexo 23.** Procedimiento para la determinación de la transformidad del marabú

## 1. Rendimiento en masa seca:

$$Rms = \text{Rendimiento} \left( \frac{t}{ha} \right) \times \text{Contenido de agua}$$

Primeramente, fue necesario conocer el rendimiento del campo, el cual, según Alba, Pérez & Arteaga, (2018) es de 37 t/ha para el contexto analizado. Este valor se multiplicó por el contenido de agua, el cual es 3,50 %. De esta forma se obtuvo el rendimiento en masa seca en t/ha.

- Rendimiento energético:

$$Re = Rms \times \text{Contenido energético} \times 100$$

Como variables se tiene el rendimiento en masa seca y el contenido energético del marabú. Esta última variable se determinó, a partir del poder calorífico neto, el cual describe el contenido energético de los biocombustibles. En la ecuación  $H_{v(w)}$  designa el poder calorífico neto en MJ/kg de la biomasa en un nivel específico de la humedad,  $H_{v(wt)}$  el poder calorífico neto de la biomasa totalmente seca, que, según Alba, Pérez & Arteaga, (2018) es 20,20 MJ/kg y  $w$  la humedad en % (10 %). La constante 2,44 corresponde a la energía de evaporación del agua.

$$H_{v(w)} = \frac{[H_{v(wt)} \times (100 - w) - 2,44 \times w]}{100}$$

De esta forma se obtuvo el rendimiento energético en J/ha.

La energía total del sistema se determinó como la sumatoria de la energía de la radiación solar y la energía de las precipitaciones según Abreu, (2017), el valor obtenido fue 1,76E+15 seJ/año.

**Anexo 24.** Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para el G.V tipo Retal.

	Bagazo	Bagazo/RAC	RAC/Marabú
Volúmenes			
Volumen de los gases triatómicos ( $V_{RO_2}$ )	0,43	0,69	0,86
Volumen teórico del nitrógeno ( $V_{O\ N_2}$ )	1,67	2,64	2,67
Volumen teórico del vapor de agua ( $V_{O\ H_2O}$ )	1,00	0,81	0,45

**Anexo 25.** Entalpías específicas de los productos de la combustión y el aire en (kJ/kg) para la combustión en una caldera Retal. Fuente: Elaboración propia.

Productos de la combustión	kJ/kg
(cđ) $RO_2$	385,5
(cđ) $N_2$	278,29
(cđ) $H_2O$	325,73
(cđ) Aire	286,84
(cđ) Ceniza	182,93

**Anexo 26:** Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire; [kJN/m<sup>3</sup>].  
Fuente: (Rodríguez, 2000)

$\vartheta$ [°C]	$(c\vartheta)_{RO_2}$	$(c\vartheta)_{CO_2}$	$(c\vartheta)_{N_2}$	$(c\vartheta)_{O_2}$	$(c\vartheta)_{H_2O}$	$(c\vartheta)_a$
100	170	170	130	131	150	134
200	358	356	260	266	304	268
300	558	558	393	405	462	405
400	772	772	528	548	628	548
500	995	995	665	700	795	690
600	1218	1224	804	846	966	834
700	1456	1463	945	1001	1148	987
800	1704	1704	1096	1160	1336	1136
900	1953	1953	1242	1314	1521	1296
1000	2200	2200	1390	1470	1720	1450
1100	2453	2453	1540	1639	1914	1606
1200	2712	2712	1704	1800	2124	1764
1300	2977	2977	1859	1963	2340	1937
1400	3234	3234	2016	2128	2562	2100
1500	3495	3495	2160	2295	2775	2265
1600	3744	3760	2320	2448	2992	2432
1700	4029	4029	2482	2618	3230	2584
1800	4302	4302	2646	2790	3456	2754
1900	4579	4560	2793	2964	3686	2926
2000	4860	4840	2960	3140	3920	3100
2100	5124	5103	3108	3297	4158	3255
2200	5390	5368	3300	3476	4400	3432

**Anexo 27.** Entalpías para las diferentes variantes de combustible (kJ/kg). Fuente:  
Elaboración propia.

Entalpías [kJ/kg]	Bagazo	Bagazo/RAC	RAC/Marabú
Entalpía de los gases a la salida (lgs) [kJ/kg]	1 582,95	2 245,09	2 212,68
Entalpía del agua alimentar (haa) [kJ/kg]	337,36	337,36	337,36
Entalpía del vapor (hvs)	2 700,59	2 700,59	2 700,59
Entalpía del aire frío que llega al generador de vapor (laf) [kcal/kg]	84,43	133,16	134,42
Entalpía del volumen teórico de gases a la temperatura de salida de los gases del generador de vapor, [kJ/kg] (logs)	963,34	1267,97	1226,32
Entalpía del aire en exceso, [kcal/kg] ( $l_{o_{exc}}$ )	608,54	959,68	968,76
Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso, [kcal/kg] ( $l_{\Delta V H_2O}$ )	11,05	17,43	17,60
Entalpía del volumen teórico de aire necesario [kJ/kg] ( $l_{o_a}$ )	608,54	959,68	968,76
Entalpía específica del aire ((c $\vartheta$ ) <sub>a</sub> )	286,83	286,83	286,83

**Anexo 28.** Eficiencia energética para la combustión en un G.V tipo Retal.

Eficiencia energética	Bagazo	Bagazo/RAC	RAC/Marabú
Método Indirecto	77,57	81,67	82,61
Método Directo	78,49	82,95	83,99

**Anexo 29.** Eficiencia exergética para un G:V tipo Retal

Eficiencia exergética del generador de vapor	18,13	18,23	19,31
--	-------	-------	-------

**Anexo 30.** Determinación de las entalpías necesarias para el balance

	Bagazo	RAC	Marabú	Bagazo/RAC	Bagazo/Marabú	RAC/Marabú
Entalpía de los gases a la salida (lgs) [kJ/kg]	1 324,14	1 878,18	1 850,61	1 601,16	1 361,31	1 875,42
Entalpía del aire frío que llega al generador de vapor (laf) [kcal/kg]	84,43	133,16	134,42	108,79	89,43	133,28
Entalpía del volumen teórico de gases a la temperatura de salida de los gases del generador de vapor, [kJ/kg] (logs)	804,91	1 059,36	1 024,04	932,13	826,82	1 055,82
Entalpía del aire en exceso, [kcal/kg] (loexc)	509,98	804,25	811,85	657,11	524,69	805,01
Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso, [kcal/kg] (IΔVH <sub>2</sub> O)	9,24	14,57	14,71	11,90	9,78	14,58
Entalpía específica del nitrógeno ((c <sub>g</sub> )N <sub>2</sub> )	233,20	233,20	233,20	233,20	233,20	233,20
Entalpía del volumen teórico de aire necesario [kJ/kg] (loa)	509,98	804,25	811,85	657,11	540,17	805,01

**Anexo 31:** Transformidad y la bibliografía de la que fue tomada, (Fuente: Elaboración propia).

Transformidades	Valor	Bibliografía
Aire	9,8200E+02	Odum et al., (1996)
Agua	5,4264E+05	Odum et al., (1996)
Bagazo	9,5501E+09	Borges et al., (2020)
RAC	3,2667E+09	Borges et al., (2020)
Marabú	7,5773E+06	Calculado
Mantenimiento	4,6000E+12	Borges et al., (2020)
Labor Humana	3,9300E+06	Borges et al., (2020)

**Anexo 32:** Matriz normalizada para el balance energético por el método indirecto.

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	0,5	0,5	0,2	0,14	0,25	0,1
RAC	2	1	0,5	0,4	0,28	0,25	0,31
Marabú	2	2	1	0,4	0,57	0,5	0,49
SUMA	5	3,5	2				

**Anexo 33:** Matriz normalizada para el caso de la eficiencia exergetica

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	0,33	0,2	0,11	0,1	0,11	0,10
RAC	3	1	0,5	0,33	0,3	0,29	0,30
Marabú	5	2	1	0,55	0,6	0,58	0,58
SUMA	9	3,33	1,7				

**Anexo 34:** Matriz normalizada para el caso de la razón de renovabilidad (%R)

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	2	4	0,57	0,6	0,5	0,55
RAC	0,5	1	3	0,28	0,3	0,375	0,32
Marabú	0,25	0,33	1	0,14	0,1	0,125	0,12
SUMA	1,75	3,33	8				

**Anexo 35:** Matriz normalizada para el caso de la eficiencia emergética (EYR)

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	2	3	0,54	0,6	0,42	0,52
RAC	0,5	1	3	0,27	0,3	0,42	0,33
Marabú	0,33	0,33	1	0,18	0,1	0,14	0,14
SUMA	1,83	3,33	7				

**Anexo 36:** Matriz normalizada para el caso de la carga ambiental (ELR)

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	3	3	0,6	0,66	0,5	0,58
RAC	0,33	1	2	0,2	0,22	0,33	0,25
Marabú	0,33	0,5	1	0,2	0,11	0,16	0,15
SUMA	1,66	4,5	6				

**Anexo 37:** Matriz normalizada para el caso del índice de sostenibilidad emergética (ESI)

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	2	3	0,54	0,57	0,5	0,53
RAC	0,5	1	2	0,27	0,28	0,33	0,29
Marabú	0,33	0,5	1	0,18	0,14	0,16	0,16
SUMA	1,83	3,5	6				

**Anexo 38:** Matriz normalizada para el caso de la eficiencia energética método directo

	Bagazo	RAC	Marabú	MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
Bagazo	1	0,5	0,5	0,2	0,14	0,25	0,19
RAC	2	1	0,5	0,4	0,28	0,25	0,31
Marabú	2	2	1	0,4	0,57	0,5	0,49
SUMA	5	3,5	2				