

**REPÚBLICA DE CUBA**  
**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



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

**Título: Estudio comparativo para la combustión de biomásas en un  
generador de vapor**

**Autor:** Liezer Arias Felipe

Tutor(es). MSc. Reinier Jiménez Borges.

Dr.C Eduardo Julio López Bastida

Cienfuegos, 2022.

### **Declaratoria de autoridad**

Declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado “Estudio comparativo para la combustión de biomásas en un generador de vapor”. Que constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución. Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

---

Autor: Liezer Arias Felipe

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

---

Información Científico Técnico Nombre y Apellidos. Firma.

---

Firma del Vice Decano.

---

Firma Tutor.

---

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

# Pensamiento

## **Pensamiento:**

“Tenemos un práctico reactor de fusión en el cielo llamado sol, no tienes que hacer nada, sólo funciona. Aparece todos los días”.

Elon Musk

# Dedicatoria

## **Dedicatoria:**

Dedico este trabajo de diploma a mi familia en general, ellos son todo en mi vida.

# Agradecimientos

## **Agradecimientos:**

Mis más sinceros agradecimientos a toda mi familia, amigos, a mis tutores por sus aportes en la realización de esta investigación.

A todos "MUCHAS GRACIAS"

# Simbología

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

FRE	-----	Fuentes Renovables de Energía
RAC	-----	Residuos Agrícolas de la Cosecha
MPa	-----	MegaPascal. Equivalente a $10^6$ Pascal
MW	-----	Mega-Watt
kWh	-----	kilowatt-hora
GWh/año	-----	Gigawatt-hora al año
$m^3$	-----	Metros cúbicos
t/h	-----	Toneladas horas
$G_{\text{evap}}$	-----	Evaporación o capacidad de la caldera [kg/h]
$B_c$	-----	Consumo de combustible [kg/h]
$Q_i^t$	-----	Poder calórico inferior del combustible [kJ/kg]
$I_{\text{gs}}$	-----	Entalpía de los gases de escape [kJ/kg]
$I_{\text{af}}$	-----	Entalpía del volumen teórico de aire frío [kJ/kg]
$\alpha_{\text{gs}}$	-----	Coeficiente de exceso de aire en los gases de escape
$Q_d$	-----	Calor disponible de la masa de trabajo [kJ/kg]
$h_{\text{gs}}$	-----	Entalpía de los gases a la salida [kJ/kg]
$h_{\text{aa}}$	-----	Entalpía del agua alimentar [kJ/kg]
$I_{\text{gs}}^o$	-----	Entalpía del volumen teórico de gases a la temperatura de salida de los gases del generador de vapor [kJ/kg]
$I_{\text{exc}}^o$	-----	Entalpía del aire en exceso [kcal/kg]
$I_{\Delta\text{VH}_2\text{O}}$	-----	Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso [kcal/kg]
$I_{\text{cen}}$	-----	Entalpía de la ceniza [kcal/kg]
$V_{\text{RO}_2}$	-----	Volumen de los gases triatómicos
$(c\vartheta)_{\text{RO}_2}$	-----	Entalpía específica de los gases triatómicos [kJN/m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{N}_2}^o$	-----	Volumen teórico del nitrógeno

$(c\vartheta)_{N_2}$ -----	Entalpía específica del nitrógeno [kJN/m <sup>3</sup> ]
$V^o_{H_2O}$ -----	Volumen teórico del vapor de agua
$(c\vartheta)_{H_2O}$ -----	Entalpía específica del vapor de agua [kJN/m <sup>3</sup> ]
$\alpha_H$ -----	Exceso de aire del horno
$D_v$ -----	Generación de vapor [t/h]
$I^o_a$ -----	Entalpía del volumen teórico de aire necesario [kJ/kg]
$(c\vartheta)_a$ -----	Entalpía específica del aire [kJN/m <sup>3</sup> ]
$V_a^o$ -----	Volumen teórico de aire [m <sup>3</sup> N/kg]
$e_{aa}$ -----	Exergía específica del agua de alimentar [kJ/kg]
$h_o$ -----	Entalpía a las condiciones del estado de referencia [kJ/kg]
$T_o$ -----	Temperatura del estado de referencia [K]
$s_{aa}$ -----	Entropía del agua de alimentar [kJ/kgK]
$s_o$ -----	Entropía a las condiciones del estado de referencia [kJ/kgK]
$E_{aa}$ -----	Exergía del agua de alimentar [kW]
$m_{H_2O}$ -----	Flujo del agua de alimentar kg/h]
$e_{combustión}$ -----	Exergía de la combustión [kW]
$m_{Comb}$ -----	Flujo másico o consumo de combustible [kg/h]
$e_{combustible}$ -----	Exergía del combustible [kW]
$h_{Comb}$ -----	Entalpía del combustible [kJ/kg]
$T_{gs}$ -----	Temperatura de los gases a la salida [°C]
$m_{ge}$ -----	Flujo exergético de los gases de escape [kg/h]
$\rho_{ge}$ -----	Densidad de los gases de escape [kg/m <sup>3</sup> ]
$V_{ge}$ -----	Volumen específico de los gases de escape [m <sup>3</sup> /kg]
$e_{ge}$ -----	Exergía de los gases de escape [kW]
$C_p$ -----	Calor específico de los gases de escape [kJ/kgK]
$T_{ge}$ -----	Temperatura de los gases de escape [K]
$e_{vs}$ -----	Exergía específica del vapor saturado [kJ/kg]
$h_{vs}$ -----	Entalpía del vapor saturado [kJ/kg]
$s_{vs}$ -----	Entropía del vapor saturado [kJ/kgK]
$e_{vs}$ -----	Exergía del vapor producido por la caldera [kW]
$m_{vapor}$ -----	Flujo de vapor [kg/h]
$E_{calv}$ -----	Pérdidas de exergía en el generador de vapor [kW]
$E_{ent}$ -----	Exergía de las entradas
$E_{sal}$ -----	Exergía de las salidas

# Resumen



## RESUMEN

En la presente investigación se realiza una comparación a partir del análisis energético-exergético aplicado a dos tecnologías de generación de vapor, el generador de vapor VU-40 y el tipo Retal. El método presentado se sustenta en la base del desarrollo de dos balances (energético, exergético) para las diferentes alternativas de biomasa existentes en nuestro país. Basado en estos criterios de preferencias la alternativa más adecuada para la conversión de biomasa en energía es la Variante V (90% RAC-10% MARABU), presentando esta una eficiencia energética de 85,82 % por el método directo ligeramente superior considerando la combustión dentro del generador de vapor VU-40. Desde el punto de vista exergético la Variante I (100% Bagazo) es la que presenta mayor eficiencia exergética con 26,69%. Los resultados obtenidos beneficiarán a futuros análisis de este tipo de generadores, cual es la mezcla de biomasa más beneficiosa para la generación de vapor es uno de los aportes de este trabajo.

**Palabras claves:** biomasa, energía, exergía, análisis, generadores de vapor.

# Abstract



## ABSTRACT

In this research, a comparison is made based on the energy-exergy analysis applied to two steam generation technologies, the VU-40 steam generator and the Retal type. The method presented is based on the development of two balances (energy, exergy) for the different biomass alternatives existing in our country. Based on these preference criteria, the most suitable alternative for the conversion of biomass into energy is Variant V (90% RAC-10% MARABU), presenting an energy efficiency of 85.82% for the direct method, slightly higher considering the combustion inside the VU-40 steam generator. From the exergetic point of view, Variant I (100% Bagasse) is the one that presents the highest exergetic efficiency with 26.69%. The results obtained will benefit future analysis of this type of generators, which is the most beneficial biomass mixture for steam generation is one of the contributions of this work.

**Keywords:** biomass, energy, exergy, analizys, steam boilers.

# Índice



## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Problema de Investigación .....	3
Hipótesis de la Investigación .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción al capítulo.....	5
1.2 Fuentes renovables de energía y su utilización energética .....	5
I.2.1. Biomasa como fuente de energía, ventajas y desventajas. .	7
I.2.2. Biomasa cañera. ....	8
I.2.3. Potencial de la biomasa en el mundo y en Cuba.....	9
I.2.4 La bioenergía y sus formas de obtención .....	11
I.2.5 La biomasa cañera y su desempeño energético.....	12
1.3. Energía y exergía conceptos fundamentales. Análisis en los procesos de combustión del bagazo de caña. ....	13
I.3.1. Energía .....	13
I.3.2. Exergía.....	13
I.3.3. Combustión del bagazo de la caña de azúcar (BCA) .....	15
1.4 Calderas o generadores de vapor .....	16
1.5 Impacto ambiental de las calderas .....	18

1.6 Conclusiones parciales del capítulo.....	18
<b>CAPÍTULO II. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ENERGÉTICO-EXERGÉTICO EN UN GENERADOR DE VAPOR. ....</b>	<b>20</b>
2.1 Método a partir de un flujograma para la determinación del rendimiento energético y exergético en el proceso de combustión. ....	20
2.2 Descripción del alcance, combustibles y tecnología a evaluar. ....	21
2.2.1 Descripción de los combustibles.....	22
2.2.2 Descripción de la tecnología.....	24
2.3 Método energético y exergético.....	27
2.4 Conclusiones parciales.....	37
<b>CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO: PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN GENERADOR DE VAPOR VU-40 Y RETAL DE 45 T/H. ....</b>	<b>39</b>
3.1 Método energético.....	39
3.1.1 Determinación del poder calórico del combustible en las distintas variantes. ....	39
3.1.2 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para los combustibles .....	39
3.1.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles .....	40
3.1.4 Determinación del coeficiente exceso de aire a la salida del horno y del generador de vapor .....	40
3.1.5 Determinación de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire .....	41
3.1.6 Determinación de las entalpías de los gases de salida y del aire frío.....	41

3.1.7 Determinación de las pérdidas mediante la combustión ....	42
3.1.8 Determinación de la eficiencia energética por el método directo e indirecto.....	44
3.2 Análisis exergético.....	46
3.2.1 Determinación de las entalpías y entropías de las entradas y salidas.....	46
3.2.2 Determinación de las exergías específicas.....	48
3.2.3 Determinación de las exergías de entrada y salida .....	48
3.2.4 Determinación de las pérdidas y eficiencia exergética .....	50
3.3 Conclusiones parciales del capítulo.....	52
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>54</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>63</b>

# Introducción



## INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios plantean que se han incrementado progresivamente desde mediados del siglo pasado los recursos naturales destinados a mantener el funcionamiento de los sistemas urbanos. La existencia de límites físicos en la naturaleza implica que este continuo incremento no sea viable indefinidamente.

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. Actualmente, las tecnologías de conversión 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. El rendimiento energético que se obtiene suele ser alto (65-95 %).(Rein, 2012). La recolección de la biomasa cañera, representa un potencial de materia prima o combustible con valor energético de aproximadamente 10 tpe % caña, en la superficie de la tierra y renovable anualmente, considerando el contenido energético de ambos combustibles. Esto constituye la atracción de las bioeléctricas asociadas a las fábricas de azúcar; aun cuando quede en el campo una parte, para cubrir las necesidades del terreno.

La utilización de la biomasa para la generación de energía se ha incrementado en los tiempos actuales a nivel mundial. Usada para satisfacer una variedad de necesidades energéticas, incluyendo la generación de electricidad, calefacción de hogares, combustibles para vehículos, y proporcionar calor para procesos industriales.

Durante el año 2015, se añadió un estimado de 147 GW de capacidad de energía renovable, el mayor incremento anual jamás registrado; aumentando la capacidad calorífica en alrededor de 38 GWt, así como la producción total de biocombustibles. La utilización de estas fuentes en la generación de electricidad está muy vinculada al desarrollo de tecnologías eficientes que permitan que esta producción sea competitiva con el uso de los combustibles convencionales en las condiciones específicas de los países en desarrollo. (Bildirici, 2013)

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Cuba como país insular, constituye una prioridad en los lineamientos actuales de la política económica y social el fomento de las fuentes renovables de energía, de ahí que la energía sea un eje transversal en este propósito. Según (J. P. M. Guerra, Coleta, Arruda, Silva, & Kulay, 2014) 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%. Especialmente para los países que producen caña de azúcar, la producción de energía a partir de la biomasa cañera, compuesta por el bagazo y los RAC, representa una oportunidad excelente para el incremento de la eficiencia económica y la protección del medio ambiente. Para Cuba la adquisición de combustibles fósiles representa un gran reto debido a los altos costos que estos presentan, la imposibilidad de la economía nacional para su adquisición agravada por la aplicación de un injusto bloqueo económico hacen cada vez más difícil el escenario actual, otra y no menos importante lo genera el impacto medioambiental que contempla la utilización de los combustibles fósiles para la generación de energía, de allí que las potencialidades de las fuentes renovables para el país debe permitir en un futuro cercano una mayor participación de las FRE (24%), en particular el papel de la biomasa representará un 14% en la generación de energía.

La fábrica de azúcar por sus características requiere de gran cantidad de energía (4 000 kcal/kg azúcar) debido al gran número de operaciones que involucra la obtención de un producto de elevada pureza (98-99 %) a partir de una materia prima vegetal (Rein, 2012). Sin embargo, entre las grandes industrias, la del azúcar de caña tiene el privilegio de disponer de una materia prima que le proporciona, en forma de biomasa, el combustible suficiente para generar la energía que necesita y entregar excedentes importantes a la red nacional, cuando se aprovecha el potencial energético de esta gramínea en una bioeléctrica con generación distribuida (CHP en inglés). En Cuba, el programa de desarrollo de la agroindustria de la caña de azúcar contempla que esta sea la mayor fuente de biomasa para el desarrollo de las fuentes renovables de energía, a partir de la generación de electricidad en modernas bioeléctricas.

Dentro de la perspectiva nacional se ha establecido el incremento de la generación eléctrica de 578,3 GWh hasta 4 621 GWh para el 2030 con un índice de generación de 69,4 kWh/t de caña molida. Es evidente el salto en el índice de generación que se pretende alcanzar con el programa de 34,1 kWh/tc hasta 69,4 kWh/tc, es decir un salto del 50,86% en la industria azucarera del país.

Existe un programa para el desarrollo en el área termoenergética de 40 centrales azucareros restantes que no formaran parte de inmediato en este programa pero que es muy necesario incrementar la eficiencia en la producción de vapor y electricidad.

Actualmente la industria azucarera cubana dispone de 185 generadores de vapor, de los cuales el 80 % trabaja a presión de 1,7 MPa y el 20 % restante a presión de 2,7 MPa. Para ello se han trazado como objetivos fundamentales el de reducir el consumo energético (el área de generación de vapor consume el 20% de la energía propia generada), así como incrementar la eficiencia en la producción de vapor y electricidad elevando la presión y temperatura del vapor directo hasta 4,2 MPa y 450 °C. Por tal motivo es necesario la evaluación desde la perspectiva energética-exergética para el proceso de combustión en los generadores de vapor actualmente existentes que permita poder establecer aquellas biomasa o mezclas de estas que resulten más favorables.

### **Problema de Investigación**

Resultan insuficientes los análisis aplicados al comportamiento de los rendimientos energéticos-exergéticos a partir de la combustión considerando dos tecnologías de aprovechamiento y diferentes biomásas como combustible.

### **Hipótesis de la Investigación**

La correcta evaluación energética-exergética considerando diferentes biomásas como combustible debe propiciar los mayores rendimientos dentro del proceso de combustión.

### **Objetivo General**

Comparar el rendimiento energético-exergético de diferentes biomásas en un generador de vapor modelo VU-40 y Retal.

### **Objetivos específicos**

1. Valorar críticamente los métodos y tecnologías de combustión de biomásas en el contexto internacional y nacional.
2. Presentar un método que integre los análisis energéticos-exergéticos en el proceso de combustión para diferentes biomásas.
3. Validar la metodología en un generador de vapor modelo VU-40 y un generador de vapor Retal de 45 t/h de vapor.

# Capítulo 1

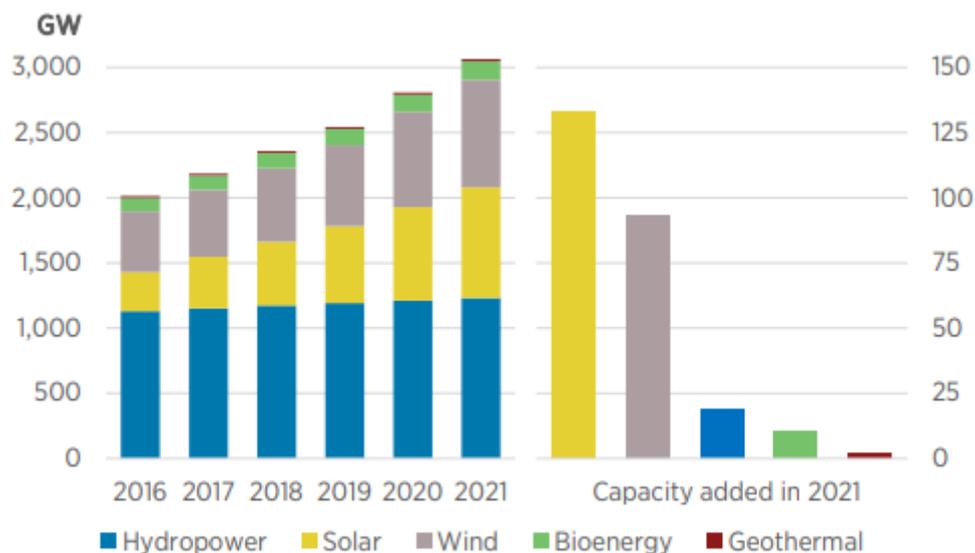
# CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1. Introducción al capítulo

En el capítulo se analizará la situación de la biomasa cañera como fuente renovable de energía y su necesidad de utilización. Se tratan diferentes técnicas que permiten determinar con mayor precisión los balances tanto energéticos como exergéticos donde se explica el significado de estos términos y se plasman sus diferencias. Se dará a conocer el concepto de cogeneración y su uso en las calderas bagaceras donde se realizará un breve resumen de los tipos y clasificaciones de esta.

## 1.2 Fuentes renovables de energía y su utilización energética

La utilización de las fuentes renovables de energía (FRE) ha sido la principal apuesta de un gran número de países con el objetivo de disminuir el consumo de los combustibles fósiles. Las fuentes renovables ostentan el primer puesto en la expansión energética el cual ha sido mantenido desde 2016. La capacidad de generación a partir de FRE se incrementó en 257 GW (+9,1%) en el 2021, destacándose la solar con un incremento de 133 GW (+19%), seguido por la eólica 93 GW (+13%). Finalmente, la bioenergía sostuvo un crecimiento de 10 GW (+8%). (IRENA, 2020). Conjuntamente la energía solar y eólica representaron el 88% de todo el crecimiento neto en el 2021.



**Figura I.1:** Esquema por año de la capacidad total de energía renovable Fuente: (IRENA 2022)

Como se puede observar en la figura I.1 la capacidad renovable geotermal y bioenergética son las de menor aprovechamiento en este último año.

Las energías renovables poseen una amplia variedad de tecnologías las cuales tienen costos determinados, eficiencia específica o impactos ambientales por tales razones cada país para incorporar en su planificación energética debe realizar una selección adecuada de las energías renovables de las fuentes de energías primarias que se encuentran en la naturaleza (sol, aire, las plantas, agua, calor terrestre, entre otros) estas tienen que tener un historial de respuestas de maneras continuas y en periodos de tiempos relativamente cortos.(Yajure, 2016).

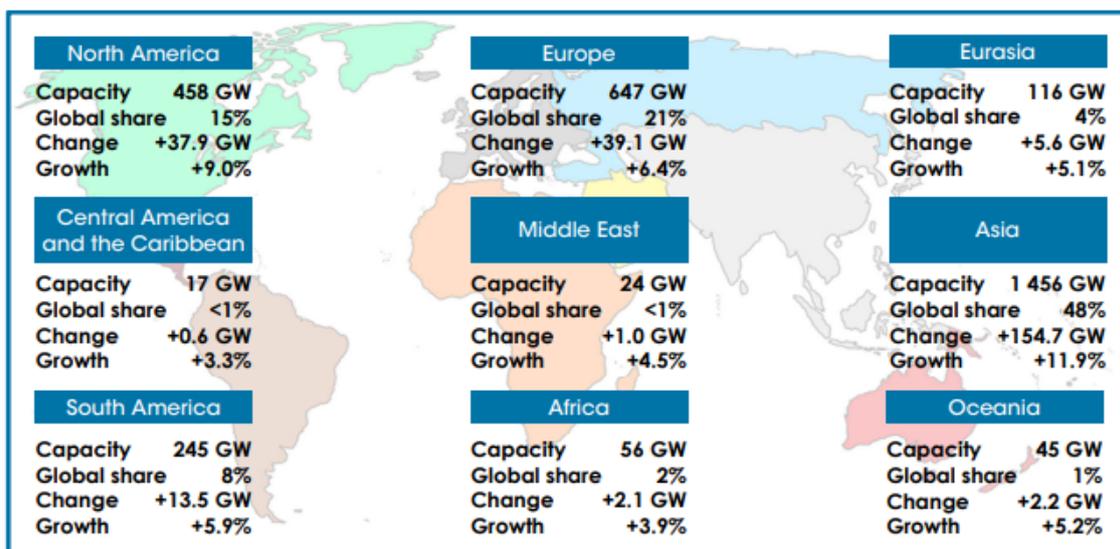
La energía es una parte central en la vida de los seres humanos y es utilizada sin pensar en los recursos y fuentes energéticas y su impacto en el medio ambiente. Actualmente la mayoría de la energía es generada de la quema de los combustibles de origen fósil, como el carbón, el petróleo o el gas; estos combustibles proveen el 66 % de la energía eléctrica a nivel global y abastecen el 95 % de la demanda energética del mundo, incluyendo al calentamiento, el transporte, la generación de electricidad, entre otros. Con la acumulación de bióxido de carbono, que se libera de la quema de los combustibles de origen fósil, se contribuye al calentamiento global y a los cambios ocurridos en el medio ambiente (Badii, Guillen, & Abreu, 2016).

La situación energética, presentada desde hace más de medio siglo y que se agudiza cada día más, plantea la necesidad de lograr combustibles y energía a partir de recursos renovables, esta tarea va principalmente encaminada a aquellos países que no son petroleros y ven como su economía se ahoga cada día más con la dependencia de este recurso renovable.

El mejoramiento de la eficiencia energética hoy en día, constituye uno de los métodos más constructivos y costeables en término de costo-beneficio para solucionar los retos de los altos precios energéticos, la seguridad energética, la contaminación ambiental y los cambios climatológicos mundiales. Actualmente el uso de energía queda críticamente desaprovechado, a pesar de los beneficios que aporta y los éxitos de los programas de eficiencia energética en diferentes partes del mundo (Badii, Guillen, & Abreu, 2016).

Las FRE han tomado fuerza en los últimos años y se han establecido como fuentes importantes de energía alrededor del mundo, correspondiéndose así con el progresivo colapso de las fuentes convencionales. La capacidad renovable alcanzó los 2 537 GW a nivel mundial a finales de 2019, registrando un aumento de 176 GW respecto al año anterior, en la figura 1.2 se puede apreciar el aumento de las fuentes renovables de energía, en la última década, según datos de Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), Asia logró más de la mitad de las nuevas instalaciones a pesar de ir a un ritmo más lento. Europa y Norteamérica alzaron su expansión de capacidad. Las energías eólica y solar representaron el 90% de la capacidad renovable actual en el

mundo, esta alta participación refleja un bajo crecimiento de la energía hidroeléctrica, debido a que varios proyectos importantes no se cumplieron en los plazos de finalización acordados. Pese a todo esto, las energías renovables representaron el 72% de las adiciones de capacidad total en 2019, superando una vez más a los combustibles fósiles por un amplio margen.



For the complete dataset see: IRENA (2022), Renewable capacity statistics 2022, available at: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).

**Figura I.2:** Total de energías renovables (2010–2019) por regiones, (Fuente: Elaboración propia).

En Centro América y el Caribe la matriz eléctrica está compuesta, en su mayor parte de fuentes limpias y renovables, debido a la abundancia de recursos hídricos, aunque esta región no está exenta de los problemas que trae la constante demanda energética.

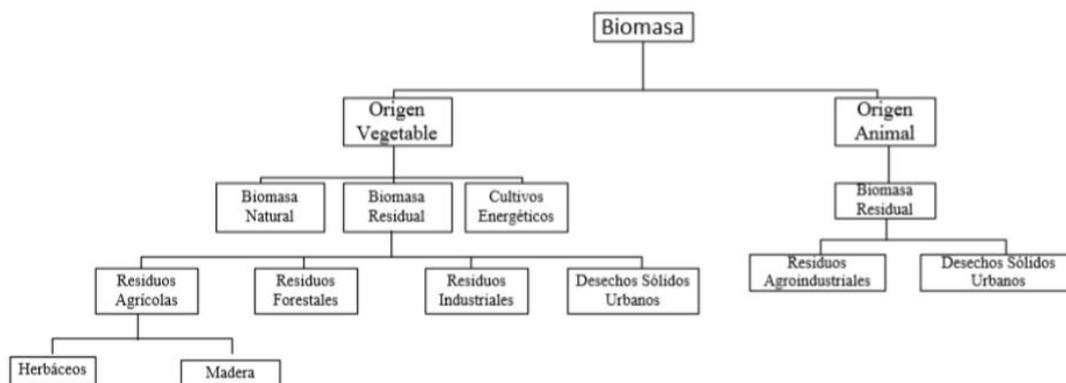
En Cuba el plan energético nacional precisa la instalación de energías renovables en el modelo energético nacional, por lo que se debe potenciar las FRE y así posibilitar el desarrollo energético. Para Cuba es de suma importancia que el proceso vinculado a la generación y consumo de energía eléctrica, se realice eficientemente ya que no posee grandes recursos económicos (Rodríguez, 2011) y que el sector de la energía es el que más ha contribuido a las emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI) y se estima que estas emisiones aumenten con el paso de los años (Allegue, 2017).

Actualmente en Cuba es baja la utilización de las FRE, ya que produce solo un 4,3 % de la electricidad y la biomasa alcanza el 3,5 %, aunque hay una gran variedad de opciones para utilizar otras fuentes renovables, entre las que se destacan la eólica y la fotovoltaica (Guerra, 2016).

### **I.2.1. Biomasa como fuente de energía, ventajas y desventajas.**

La biomasa se define como una porción biodegradable de los productos que proceden de actividades agrarias, de la silvicultura y otras industrias semejantes; es decir, es el

conjunto de materia orgánica renovable que tiene su origen como consecuencia de un proceso biológico. Esta alcanza productos tanto de origen vegetal como animal, como se pueden apreciar en la figura I.3 (BUN-CA, 2002; Saidur et al., 2011).



**Figura I.3:** Clasificación de las diferentes fuentes de biomasa, (Fuente: Jiménez et al., 2017).

Esta fuente de energía tiene una infinidad de usos, ya que se puede emplear quemándola para obtener calor o para generar electricidad mediante calderas y turbinas de vapor, también puede ser utilizada para obtener gas metano, biodiesel y otros biocombustibles. El uso de esta energía presenta grandes ventajas como son: la disminución del impacto ambiental y la dependencia energética de los combustibles fósiles, las fuentes de biomasa están presentes en grandes cantidades en todo el planeta, lo que presenta la posibilidad de almacenarse como energía en forma de biomasa, que es más fácil que la energía obtenida de otras fuentes como eólica y solar; esta también presenta inconvenientes, ya que son muy costosos los proyectos de aprovechamiento de biomasa que implican recolección y se necesita en ocasiones áreas muy extensas para los distintos procesos destinados la obtención de energía y su almacenamiento (Sánchez, 2017).

### **I.2.2. Biomasa cañera.**

La biomasa cañera se compone por el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC) (Torres, 2007), la utilización de esta biomasa constituye, desde hace décadas y en especial en la actualidad, una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y el impulso de un desarrollo sostenible (Rubio, Hernández & Rubio, 2018).

La potencialidad de la reutilización y creación de nuevas cadenas productivas están dadas por la naturaleza orgánica de los co-productos y subproductos del procesamiento de la caña de azúcar en cada temporada (zafra), generando grandes ventajas; al utilizar estos subproductos se permite un desarrollo industrial dentro de un ciclo cerrado de

aprovechamiento integral, el cual comienza en la cosecha de los materiales y termina en los productos residuales y satisface una gran variedad de necesidades energéticas. Según Torres, (2007), considerando el valor energético de la biomasa cañera, en los cañaverales se almacena la suficiente energía solar como para sustituir una tonelada de petróleo equivalente a diez toneladas de caña limpia que se cosecha.

El bagazo se obtiene luego de someter la caña de azúcar a diferentes procesos, primero se pica en pequeños trozos, luego es molida y se le extrae el guarapo que es el que contiene el azúcar y después mediante el proceso de imbibición adicionándole agua y alternando con la compresión, se obtiene una masa fibrosa, que contiene aproximadamente un 50 % de sólidos y un 50 % de agua (Rubio, 2015).

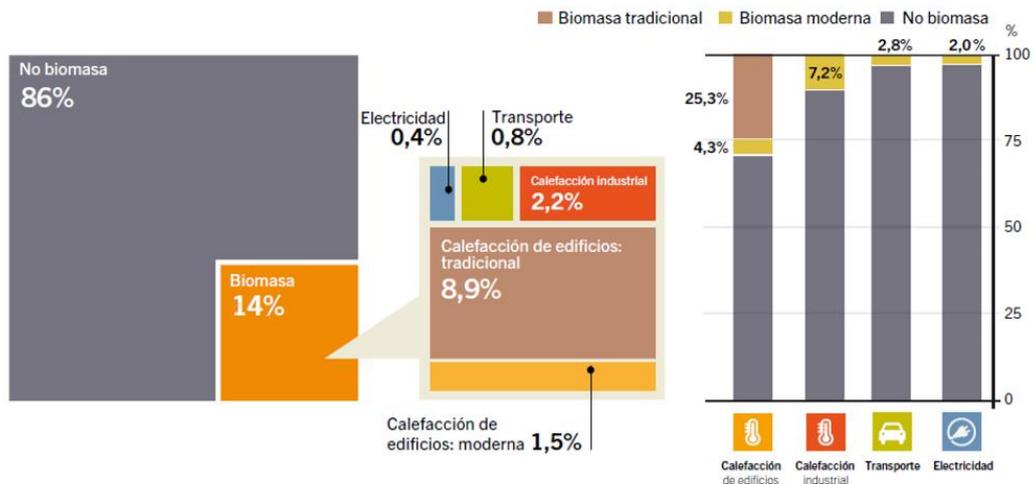
Los RAC se constituyen por las hojas verdes y secas de la caña y pedazos de tallo. Se pueden emplear con el objetivo de sustituir al petróleo y la leña como combustibles complementarios y de arranque y para ahorrar bagazo, para que sea suministrado como materia prima en otras industrias. También sirve para suplir la carencia energética que se produce en los centrales debido a la inestabilidad de la molida (Rubio, 2015).

### **I.2.3. Potencial de la biomasa en el mundo y en Cuba.**

La biorrefinería surgió con la necesidad de utilizar la biomasa de una manera más racional y limpia, la demanda energética y la necesidad de diversificar productos para hacer frente al crecimiento de la competencia a nivel global (Sacramento et al., 2010; Bonomi et al., 2016). Esta se centra en el uso eficiente de la biomasa como materia prima para la producción integrada de combustibles, energías y productos químicos. En una fábrica en la que se procese o genere biomasa puede convertirse en una biorrefinería (González et al., 2014).

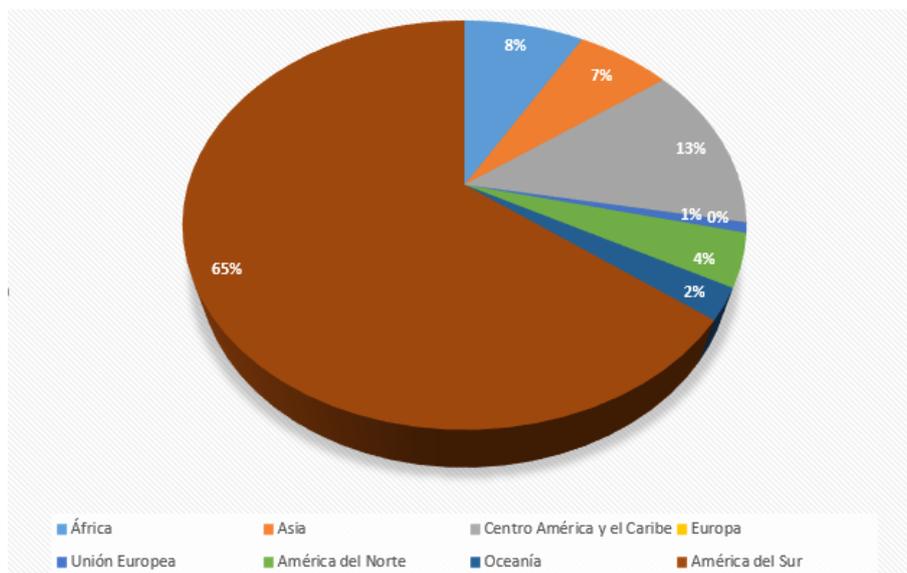
Los biocombustibles son aquellos combustibles orgánicos primarios o secundarios derivados de la biomasa, estos pueden ser utilizados para obtener energía térmica por combustión u otro proceso; al igual que el resto de combustibles orgánicos, la combustión completa tiene como productos el dióxido de carbono y el vapor de agua (Bravo, 2015).

La biomasa es mundialmente utilizada en diferentes sectores, por lo que no solo es utilizada para producir electricidad, sino también en el transporte y en la calefacción industrial, como se muestra en la figura I.4:



**Figura I.4:** Participación de la biomasa en el consumo total final de energía y en el consumo final de energía por sector de uso final, 2014, (Fuente: Sawin, 2016).

Según datos de la IRENA la producción de electricidad, mediante el uso de bagazo ha aumentado con el paso de los años, alcanzándose en el 2019 un total de 18 997 MW, el cual se desglosa en la figura I.5 por áreas, siendo América del Sur la región con mayor capacidad de generación eléctrica, utilizando energías renovables, en este caso biomasa, obteniendo una capacidad de 12 376 MW.



**Figura I.5:** Total de energías renovables a partir de biomasa en 2019 por áreas, (Fuente: Elaboración propia).

Como la biomasa es una fuente que posee perspectivas a mediano y largo plazo, Cuba, al ser un país agrícola con una industria azucarera que genera millones de toneladas de residuos y subproductos de altas potencialidades energéticas, posee un amplio potencial de la biomasa. En el país desde hace algunos años se aprobó un programa para el incremento de generación de electricidad con biomasa cañera, el mismo tiene

como horizonte temporal el año 2027 y se propone lograr, que ese año, el 14 % de la electricidad del país se genere a base de biomasa cañera. Este programa, le permitirá a la industria azucarera cubana alcanzar una potencia para generación de electricidad de 1 070 MW y de ella 870 MW (81 %) estarán en nuevas instalaciones (GEBC, 2016). En Cuba, según "Aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la agricultura cubana", (2018), se cuenta con unas 26 000 t de residuos de las industrias de arroz y la poda de las plantaciones de cítricos, 23 000 t de maderable no utilizado del manejo de los bosques, plantaciones existentes y aprovechamiento de los residuos de las industrias forestales, en el caso del marabú se registran 731 633,3 hectáreas con infestación pesada y media de marabú, la cual posee una densidad de entre 600 y 1 190 kg/m<sup>3</sup>, con un crecimiento de hasta 7 m de altura y alta dureza y solidez, con un período de servicio de 50 años. El marabú es un excelente combustible, ya que posee un bajo contenido de humedad (22% de humedad de almacenaje, en el extremo inferior del rango para una astilla secada al aire) y se estima que tengan un rendimiento promedio de 70-90 t/h.

El biogás presenta un alto potencial en nuestro país, existen 139 granjas estatales, 7 864 convenios porcinos y 1 999 vaquerías con un combustible equivalente a 241 782 t/año, para una producción de electricidad de 807 552 MWh/año con una potencia de 101 MW ("Aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la agricultura cubana," 2018).

La biomasa cañera cuenta, según Hernández, (2018), con una capacidad instalada de 470 MW en 57 centrales azucareros, 0,82 MW instalados en 5 plantas de biogás, así como 0,50 MW para el aprovechamiento en 4 plantas de biomasa no cañera, por lo que sobre esta fuente se encuentra enmarcada la utilización actual de las FRE. La IRENA estimó en el 2019 una capacidad de generación eléctrica, en Cuba, utilizando bagazo, de 553 MW.

#### **I.2.4 La bioenergía y sus formas de obtención**

La biomasa en términos energéticos no es más que un combustible procedente de productos y residuos naturales. (Vignote, 2016).

Para la obtención de los biocombustibles de la biomasa se utilizan métodos como el de fermentación en los cuales se obtienen biocarburantes como alcohol, éteres, esteroides y otros productos químicos que resultan después de ser extraídos de plantas silvestres o de cultivo, algunas de estas son el maíz, caña de azúcar, así como paja de arroz. (Salinas & Gasca, 2009).

Según (Quirós et. al, 1995) existen determinados cultivos que se emplean exclusivamente de cara a su aprovechamiento energético. También pueden tener un

aprovechamiento energético distintos tipos de productos agrícolas (cereales, remolacha, etc.). Se pueden diferenciar dos tipos de cultivos energéticos:

- Los orientados a la producción de materiales leñosos, mediante especies de crecimiento rápido y con turnos de aprovechamiento de ciclo corto. Estos materiales pueden ser orientados a un aprovechamiento vía termoquímica o a la obtención de biocombustibles.
- Los orientados a la producción de otros tipos de materiales vegetales mediante especies de ciclo anual, destinada a la obtención de biocombustibles

### **I.2.5 La biomasa cañera y su desempeño energético**

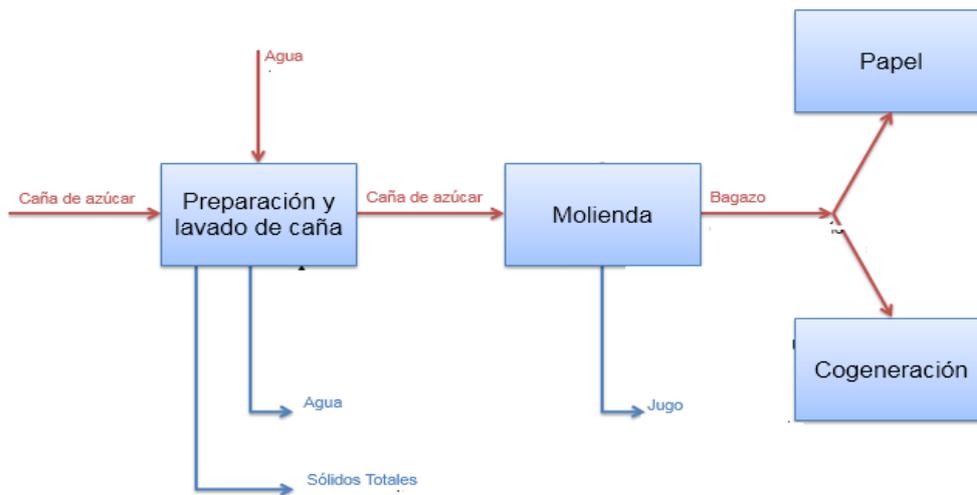
La biomasa cañera a lo largo de los años nos ha suministrado de energía para un desarrollo sostenible siendo una de las fuentes renovables que permite mediante su utilización un menor impacto ambiental (Roque, 1998). Cuba al igual que otros países aprobó un programa para el incremento de la generación de energía eléctrica a partir de la biomasa cañera, estas son el bagazo de caña y la paja de caña utilizándose ambos como combustibles en Cuba desde hace muchos años. (GEBC, 2016)

El bagazo de caña es el exceso del proceso de molienda de la caña de azúcar después de ser extraído el jugo, este está constituido principalmente por hemicelulosa, agua, solidos solubles además de estar formada por fibras compuestas por celulosa, pentosa y lignina como se muestra a continuación en la tabla I.1. (Rosa, 2007) (Aiello & Pernalet, 2008)

**Tabla I.1:** Composición de la fibra del bagazo de caña de azúcar. Fuente: (Taurachand, 2005)

Celulosa	48 %
Pentosa	28, 7 %
Lignina	14, 3 %
Ceniza	2, 4 %
pH	6, 1
Nitrógeno total	1, 23 %
Carbono	29, 36%
Fósforo disponible	2, 396 g/L
Potasio disponible	0, 0216 g/L

Fuente: (Taurachand, 2005)



**Figura I.6** Proceso de molienda de la caña de azúcar. Fuente: (Buitrago & Pinto, 2015)

### **I.3. Energía y exergía conceptos fundamentales. Análisis en los procesos de combustión del bagazo de caña.**

#### **I.3.1. Energía**

La energía es una magnitud física que se presenta vario diversas formas, está involucrada en todos los procesos de cambio de estado, se transforma y se transmite, dependiendo del sistema de referencia y fijado este se conserva” (Machado & Martínez, 1994)

Esta forma una parte importante en la vida cotidiana, de su correcta utilización depende la calidad de vida y la sostenibilidad de las personas. Por lo que es de gran importancia tener una buena comprensión de las fuentes energéticas, la conversión de la energía de una forma a otra y las ramificaciones de estas conversiones. Algunas de las numerosas formas de energía son: térmica, mecánica, eléctrica, química y nuclear, incluso la masa puede ser considerada una forma de energía. Según su definición fundamentada en la 1ra ley de la termodinámica ( $\Delta E=W+Q$ ) en un sistema cerrado el calor no es una forma de energía sino que al igual que el trabajo modifica la energía mediante una transferencia de la misma (Cengel, 2012).

#### **I.3.2. Exergía**

La exergía (también llamada disponibilidad) es el trabajo que puede ser extraído de un flujo o de un sistema como resultado de condición de no equilibrio relativo a alguna condición de referencia (Riviero et. al, 1990). La cual también puede ser definida como el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema en un estado y un ambiente especificados. También se puede definir la irreversibilidad (conocida como destrucción de exergía o trabajo perdido) el cual no es más que el potencial de trabajo desperdiciado durante un proceso como resultado de irreversibilidades. (Cengel, 2012).

Debido a la sensatez de algunos países acerca de que los recursos energéticos mundiales son limitados se ha intensificado el interés en la comunidad científica para considerar más de cerca a los medios de conversión de energía y desarrollar nuevas técnicas que permitan utilizar mejor los limitados recursos existentes. La primera ley de la termodinámica sirve meramente como una herramienta necesaria para contabilizar la energía durante un proceso, sin embargo, la segunda ley tiene que ver con la calidad de la energía: más específicamente, se ocupa de la degradación de la energía durante un proceso, de la generación de entropía y de la pérdida de oportunidades para efectuar trabajo, además de ofrecer el margen suficiente para la mejora. La segunda ley de la termodinámica ha demostrado ser una herramienta muy poderosa en la optimización de sistemas termodinámicos complejos. (Cengel, 2012).

En los sistemas biológicos la exergía incluye tanto la energía que puede ser convertida en trabajo (almacenada en la biomasa) como la información biológica que separa a los organismos de su entorno (Jorgensen & Fath, 2004a). La exergía refleja el grado de desarrollo o complejidad en un ecosistema, y su crecimiento y desarrollo son el resultado de un sistema de componentes y configuraciones que maximizan el flujo de energía útil y la cantidad de exergía almacenada (Silow & Mokry, 2010).- Es necesario tener bien claro las diferencias entre energía y exergía las cuales se encuentran explícitas en la tabla I.2.

**Tabla I.2: Comparación entre la energía y la exergía**

<b>Energía</b>	<b>Exergía</b>
Primera ley de la termodinámica	Segunda ley de la termodinámica
Nada desaparece	Todo se dispersa
Energía es movimiento o capacidad de producirlo	Exergía es trabajo (movimiento ordenado o habilidad para producir trabajo)
$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$ , donde $\Delta Q$ : energía adicional al sistema como calor, $\Delta U$ : cambio en la energía interna U del sistema, $\Delta W$ : energía extraída del sistema como trabajo	$E = T_0 * \Delta S^{tot}$ , donde E: Exergía, $T_0$ :temperatura del ambiente, $\Delta S^{tot}$ :cambio en la entropía del sistema total $S^{tot}$ (sistema y ambiente )
$U = m * c^2$ , donde energía U y materia m “son lo mismo”	$E = k * \ln 2 T_0 I$ , donde exergía E e información I “son lo mismo”
Energía es todo	Exergía es contraste
Energía siempre se conserva (en balance), no puede ser producida o consumida	Exergía siempre se conserva en procesos reversibles, pero se reduce en los procesos

	irreversibles (procesos reales),nunca está en balance en los procesos reales
Energía es una medida de cantidad	Exergía es una medida de cantidad y calidad

Fuente: (Wall & Gong, 2001).

### I.3.3. Combustión del bagazo de la caña de azúcar (BCA)

La utilización de la biomasa para la generación de energía mediante la combustión se ha convertido en una gran problemática a resolver con el objetivo de disminuir el uso de los combustibles fósiles. (Medina et al., 2007)

Las tecnologías de termo conversión de biomasa en energía pueden competir con las basadas en combustibles fósiles si las mismas llegan a ser eficiente. La pirólisis y gasificación de bagazo de caña de azúcar y de otros residuos agrícolas se puede considerar como una alternativa eficiente de obtención de energía. Los procesos de pirólisis y gasificación de la biomasa con el fin de mejorar las propiedades combustibles y almacenamiento de las mismas conllevan a un gran gasto de la propia energía contenida en la biomasa. (Suárez & Beatón, 2003) (Pérez, 2005).

La determinación de la exergía química en la biomasa resulta un proceso difícil por la continua variación de la composición química durante el proceso de pirólisis. Por tal motivo se emplea una correlación de la exergía química de los combustibles con su poder calorífico inferior.

**Tabla I.3:** Valores de exergía de la biomasa y sus carbonizados a diferentes temperaturas

Temp. de la pirólisis	Exq. BCA kJ/kg	Exq. Marabú kJ/kg
30	20 390	20 576
100	20 424	20 629
200	22 174	22 229
300	26 728	27 009
394	32 572	33 887
500	32 184	34 080
600	32 402	34 245
700	33 358	34 538
800	33 441	34 605

Fuente: (Medina et al., 2007)

En la tabla anterior es apreciable el hecho de que un incremento de la temperatura de carbonización por encima de los 400°C exige de un mayor gasto energético, donde

puede concluirse que por encima de esta temperatura el beneficio de los combustibles que se analizan pudiera ser de poco interés, debido al poco incremento que se logra en su calidad. (Medina et al., 2007)

Según resultados obtenidos por (Medina et al., 2007) el marabú posee un rendimiento mayor en masa y calor específico de combustión en un rango de temperatura entre 30 y 800°C que el bagazo de caña y la exergía química de ambas biomásas producidas por la pirolisis aumenta con la temperatura de carbonización siendo ligeramente superior las muestras de marabú.

#### **1.4 Calderas o generadores de vapor**

La generación de vapor es el proceso donde se transforma el agua en vapor mediante la utilización de energía química liberada durante la combustión de un combustible provocando un cambio de fase en el agua de estado líquido a vapor con una presión por encima de la presión atmosférica. Los objetivos principales de las calderas o generadores de vapor son a gran escala la de generar agua caliente para calefacción y uso general y generar vapor para plantas de fuerza, procesos industriales o calefacción. En el caso que los combustibles sean de procedencia orgánica como la biomasa la forma de obtención de energía varía según el combustible empleado pueden ser transformadas en energía a partir de métodos bioquímicos y métodos termoquímicos.

Los métodos termoquímicos más empleados son:

- **Pirolisis:** consiste en la descomposición de la biomasa empleando el calor (aproximadamente se trabaja alrededor de los 500 °C) en un entorno anaerobio, es decir, en ausencia de oxígeno. Este proceso da lugar a residuos sólidos carbonosos, líquidos carbonatados y gases constituidos por óxidos de carbono, hidrocarburos e hidrógeno.
- **Gasificación:** tras llevarse a cabo la combustión se generan distintas cantidades de elementos químicos como el dióxido de carbono, el hidrógeno, el carbono y el metano. Las condiciones de trabajo difieren de las empleadas en la pirolisis ya que se trabaja con un porcentaje de oxígeno oscilante entre 10 y 50 %, y con temperaturas que pueden variar entre 700 y 1 500 °C. Aparecen dos procesos distintos de gasificación, por un lado, el gas de síntesis el cuál ha ganado importancia en la actualidad ya que puede ser transformado en combustibles líquidos, y por otro el gas pobre conocido como gasógeno.
- **Combustión:** consiste en quemar la biomasa con ayuda de un exceso de aire (alrededor de un 20 y un 40 % más que el teórico) a temperaturas algo menores que las empleadas en la gasificación ya que se trabaja entre 600 y 1 300 °C.

- **Co-combustión:** la combustión de carbón en las calderas se apoya por la biomasa como combustible de ayuda, lo que supone la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y de consumo de carbón.

Los métodos bioquímicos se emplean en la obtención de energía a partir de combustibles orgánicos que presentan una mayor cantidad de humedad relativa, existiendo únicamente dos métodos de descomposición:

- **Fermentación alcohólica:** se realiza a partir de plantas ya que en estas se encuentran presentes hidratos de carbono que al disolverse permiten la obtención de etanol usado en la industria.
- **Fermentación metánica:** la materia se descompone a partir de una digestión anaerobia, dando lugar al biogás. (Martín,2018)

Existe una amplia variedad de calderas de las cuales muchas de ellas se han llegado a popularizar en el ambiente industrial algunos ejemplos de estas son calderas del tipo paquete, calderas marinas, calderas tipo express. Sin embargo, las más aceptadas se basan en la circulación del agua y de los gases calientes en la zona de los tubos de calderas según esto se tiene dos tipos generales de calderas:

**Pirotubulares o de tubos de humo:** En estas calderas, los gases pasan dentro de los tubos, cediendo su calor al agua que los rodea. Según (Espinola, 2017) este tipo de calderas se usan generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente pequeña, no se utiliza para el accionamiento de turbinas, su alimentación depende de su tamaño o en la adaptabilidad de su diseño. Tienen, sin embargo, la ventaja de su gran volumen de almacenamiento de agua, además de su peculiaridad de compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones en la demanda de vapor. Debido a su gran volumen de agua, el tiempo que necesita para alcanzar su presión de trabajo partiendo de un arranque en frío, es considerablemente menor que el requerido para una caldera acuotubular. Las presiones máximas de operación oscilan en torno a (2 000 kPa). Su rendimiento varía entre un 70 % y un 80%.

**Calderas Acuotubulares o de tubo de agua:** El agua circula por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que pasan por el exterior de los mismos y los gases calientes se dirigen a través del exterior de los tubos, este tipo puede proyectarse para quemar cualquier tipo de combustible en diversos tipos de parrilla. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, en torno a (20 000 kPa) y tienen menor inercia térmica. La estructura de los tubos no ha de ser tan robusta como en las calderas pirotubulares. En su contra están una mayor inversión inicial en la instalación y mayores problemas de suciedad en el lado del agua. Su rendimiento está entre un 80 % y un 90 %. (Espinola, 2017).

## **I.5 Impacto ambiental de las calderas**

Según (Michigan University, 2001) las calderas bagaceras que a través de la combustión de un residuo celulósico producen la energía necesaria para la industria azucarera generan emisiones de particulado, cuya magnitud dependen principalmente del tipo de combustión y de las condiciones de operación del sistema utilizado.

Los resultados arrojados por (Hernández, Rinosa & Hernández, 2017) refleja que la estimación de los contaminantes atmosféricos de los centrales azucareros de Cienfuegos tiene una emisión inferior a las termoeléctricas y grupos electrónicos y las comparaciones de las emisiones con las (EMA) Empresa de Máximas Emisiones de la NC/TS 803:2010 para la categoría de fuentes existentes demuestra que ninguna de las emisiones de SO<sub>2</sub> sobrepasa los límites normativos. Mientras para el MP y los NO<sub>x</sub> todas las chimeneas sobrepasan los límites establecidos.

## **1.6 Conclusiones parciales del capítulo**

1. A partir de la revisión bibliográfica se reveló que en la actualidad la biomasa a nivel mundial tiene una participación del 14 %, en el consumo total de energía siendo aun predominante la utilización de los combustibles sólidos. En Cuba la utilización de las FRE, es muy baja, pues produce solo un 4,3 % de la electricidad y la biomasa alcanza el 3,5 %.
2. El uso y el empleo de la biomasa, así como otras fuentes de energías renovables para la producción de energía térmica aplicada en distintas tecnologías como generadores de vapor y hornos son alternativas tecnológicas que apoyan la conciencia medioambiental.
3. La implementación de los balances de energía y exergía en la producción de vapor, permite un uso adecuado en el aprovechamiento energético, así como en la evaluación de las pérdidas energéticas aplicándolo a procesos de cogeneración.

# Capítulo 2

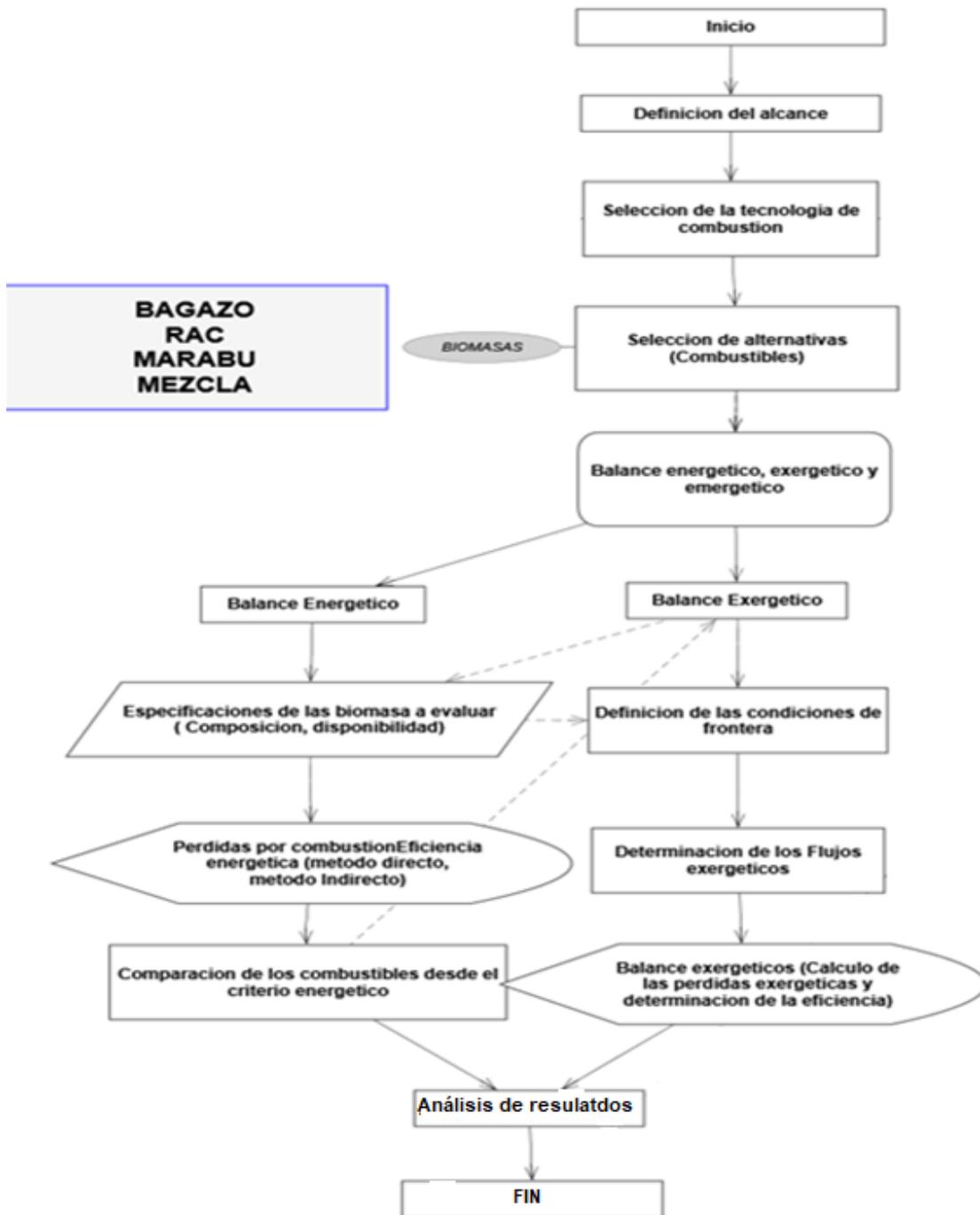
## **CAPÍTULO II. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ENERGÉTICO-EXERGÉTICO EN UN GENERADOR DE VAPOR.**

### **2.1 Método a partir de un flujograma para la determinación del rendimiento energético y exergético en el proceso de combustión.**

En este capítulo se presenta la propuesta de un flujograma que permite integrar los métodos energéticos-exergéticos para la determinación de los rendimientos dentro del proceso de combustión para diferentes biomásas a emplear como combustible en la industria azucarera.

Los resultados obtenidos aportan 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.

Para ello la figura II.1 presenta un diagrama heurístico que describe las dos etapas de desarrollo.



**Figura II.1** Diagrama heurístico de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 Descripción del alcance, combustibles y tecnología a evaluar.

El alcance de la investigación está dado en la evaluación de los métodos energéticos-exergeticos para diferentes biomasas a utilizar como combustible en la industria azucarera. El análisis se centra en el proceso de combustión mediante la determinación de indicadores energéticos-exergeticos que permitan formar de base para la evaluación general.

## 2.2.1 Descripción 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) (Arias & Ponce, 2018)

### Bagazo

El bagazo es utilizado, además de la aplicación energética, como alimento animal, abono, cama para aves de corral, como cubierta protectora de la tierra recién sembrada y mezclado con estiércol como abono, entre otros (Cevallos, 2008). El bagazo que sale del último molino del tándem, contiene entre 55 y 60 % de fibra útil (Arias & Ponce, 2018). La composición elemental en base seca del bagazo se muestra en la tabla II.1:

Tabla II.1 Composición elemental en base seca del bagazo Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

<b>Composición elemental en base seca (%) de los residuos de la producción de azúcar de caña y pulpa.</b>						
<b>Residuo</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
<b>Bagazo</b>	70,00	6,00	45,84	0,13	0,04	1,00

A la hora de quemar el bagazo sin preparación previa, este, va a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla II.2 se presentan los rangos de variación de la materia volátil, el carbono fijo y la ceniza de la masa de trabajo del bagazo en la producción de caña de azúcar y de pulpa.

Tabla II.2 Análisis inmediato de la masa de trabajo del bagazo Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

<b>Análisis inmediato de la masa de trabajo de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa (%).</b>				
<b>Residuo</b>	<b>Humedad</b>	<b>Materia volátil</b>	<b>Carbono fijo</b>	<b>Ceniza</b>
<b>Bagazo</b>	45 – 50	39 – 55	4 – 8	0,55 – 2,2

La composición elemental (análisis último o final), con humedad promedio de la masa de trabajo del bagazo como sale del tándem, después de cuatro días expuestos a secado natural, se resume en la Tabla II.3.

Tabla II.3 Composición elemental de la masa de trabajo del bagazo Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

<b>Composición elemental de la masa de trabajo (%), de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.</b>							
<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</b>	23,50	3,00	22,92	0,06	0,02	0,50	50

## Residuos Agrícolas de la Cosecha (RAC)

Las posibilidades de incorporación y empleo de los RAC como biomasa en la industria, para la cogeneración de energía junto con el bagazo, dependen de los sistemas de cosecha empleados (Aguilar, 2014). Los RAC representan un potencial de biomasa equivalente al 30 % de toda la materia seca aprovechable en la cosecha de la caña, con un valor calórico que fluctúa entre 1 700- 4 500 kcal/kg (Rodríguez & Rosabal, 2017). La composición elemental en base seca de los RAC se muestra en la tabla II.4:

Tabla II.4 Composición elemental en base seca de los RAC Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

<b>Composición elemental en base seca (%) de los residuos de la producción de azúcar de caña y pulpa.</b>						
<b>Residuo</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
<b>RAC</b>	43,70	5,75	44,32	0,22	0,06	5,95

Al igual que el bagazo, a la hora de quemar los RAC, sin prepararlos previamente, estos, van a presentar un comportamiento que va a depender principalmente del contenido de humedad. En la Tabla II.5 se presentan los rangos de variación de la materia volátil, el carbono fijo y la ceniza de la masa de trabajo de los RAC en la producción de caña de azúcar y de pulpa.

Tabla II.5: Análisis inmediato de la masa de trabajo de los RAC Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

<b>Análisis inmediato de la masa de trabajo de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa (%).</b>				
<b>Residuo</b>	<b>Humedad</b>	<b>Materia volátil</b>	<b>Carbono fijo</b>	<b>Ceniza</b>
<b>RAC</b>	8 – 15	60 – 77	10 – 16	4,6 – 6

La composición elemental (análisis último o final), con humedad promedio de la masa de trabajo de los RAC, después de cuatro días expuestos a secado natural, se presenta en la Tabla II.6.

Tabla II.6 Composición elemental de la masa de trabajo de los RAC Fuente: (Rodríguez Arias et al., 2019)

<b>Composición elemental de la masa de trabajo (%), de los residuos agro-industriales de la producción de azúcar de caña y pulpa.</b>							
<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>RAC</b>	37,15	4,89	37,67	0,19	0,05	5,06	15

## Marabú

El marabú, *Dichrostachys cinerea* (L.), se identifica en nuestro país como un importante combustible complementario para las bioeléctricas. Este existe en grandes cantidades, aunque tiene limitantes: es finito en el tiempo y las tierras que se liberen al cosecharlo deberán dedicarse a la producción de alimentos (Rubio, Iturria, Palmero & Viera, 2019).

El marabú es un combustible joven, con un bajo contenido de carbono y alto de oxígeno, su composición elemental, según una muestra recogida en diferentes zonas del Municipio San Luis en Santiago de Cuba, se muestra en la tabla II.7.

Tabla II.7 Composición elemental de marabú. Fuente:(Rubio-González1, Quintero2, Marín3, ., & Rodriguez4, 2019)

<b>Composición elemental (%)</b>							
<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>Marabú</b>	46,34	3,33	49,28	0,56	0,49	0	0

En la tabla II.8 se muestra mediante un análisis, propiedades del marabú como son humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas, cada una de estas expresadas en %.

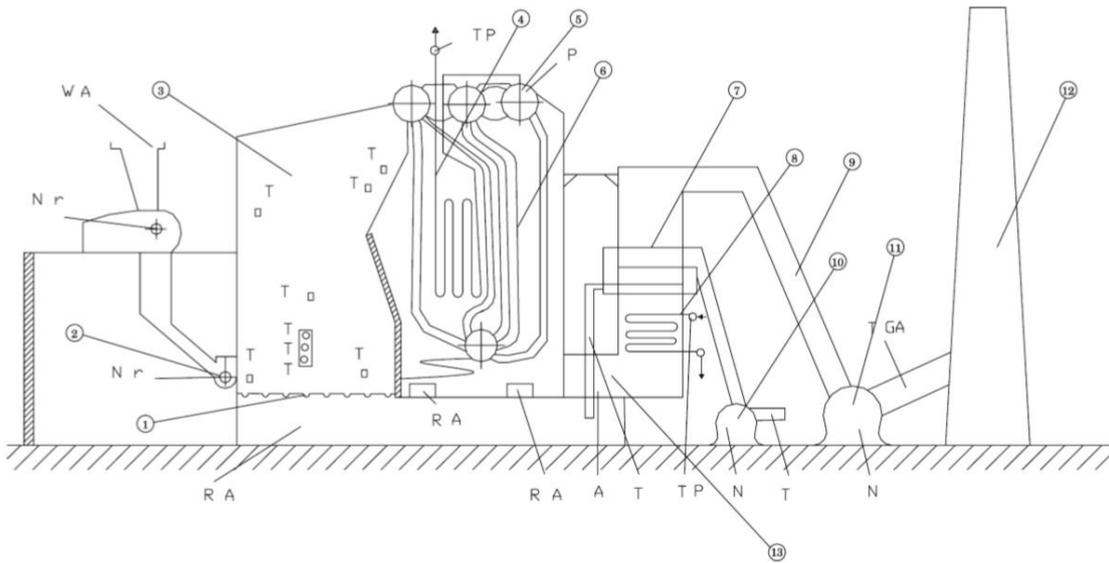
Tabla II.8 Análisis inmediato (%) (Fuente: Fuente: (Rubio-González1 et al., 2019)

<b>Humedad</b>	<b>Volátiles</b>	<b>Carbono fijo</b>	<b>Cenizas</b>
3,40	50,04	0	0

### 2.2.2 Descripción de la tecnología

Cuba es uno de los principales países exportadores de azúcar del mundo y entre las provincias con mayor desarrollo en este sector se encuentra Cienfuegos, la cual cuenta con cinco centrales, en estos predominan los Generadores de Vapor (G.V) tipo RETAL, cuya capacidad varía, pudiendo encontrarse de 45 t/h y de 60 t/h. Es por tal motivo que una de las tecnologías de aprovechamiento energético para evaluar las biomásas seleccionadas en este estudio se realizará en dichos G.V, que son además los de mayor presencia en los centrales para la combustión de bagazo en nuestro país. La figura II.2 muestra el esquema de una caldera de tipo RETAL y las zonas que la componen (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).

El G.V moderno es un equipo altamente complejo, este es un intercambiador de calor de gran complejidad, en el cual se transfiere al agua el calor suministrado por el combustible para formar vapor. El incremento de la eficiencia en el G.V es una necesidad de los procesos energéticos, ya que en la actualidad estos presentan valores muy bajos.



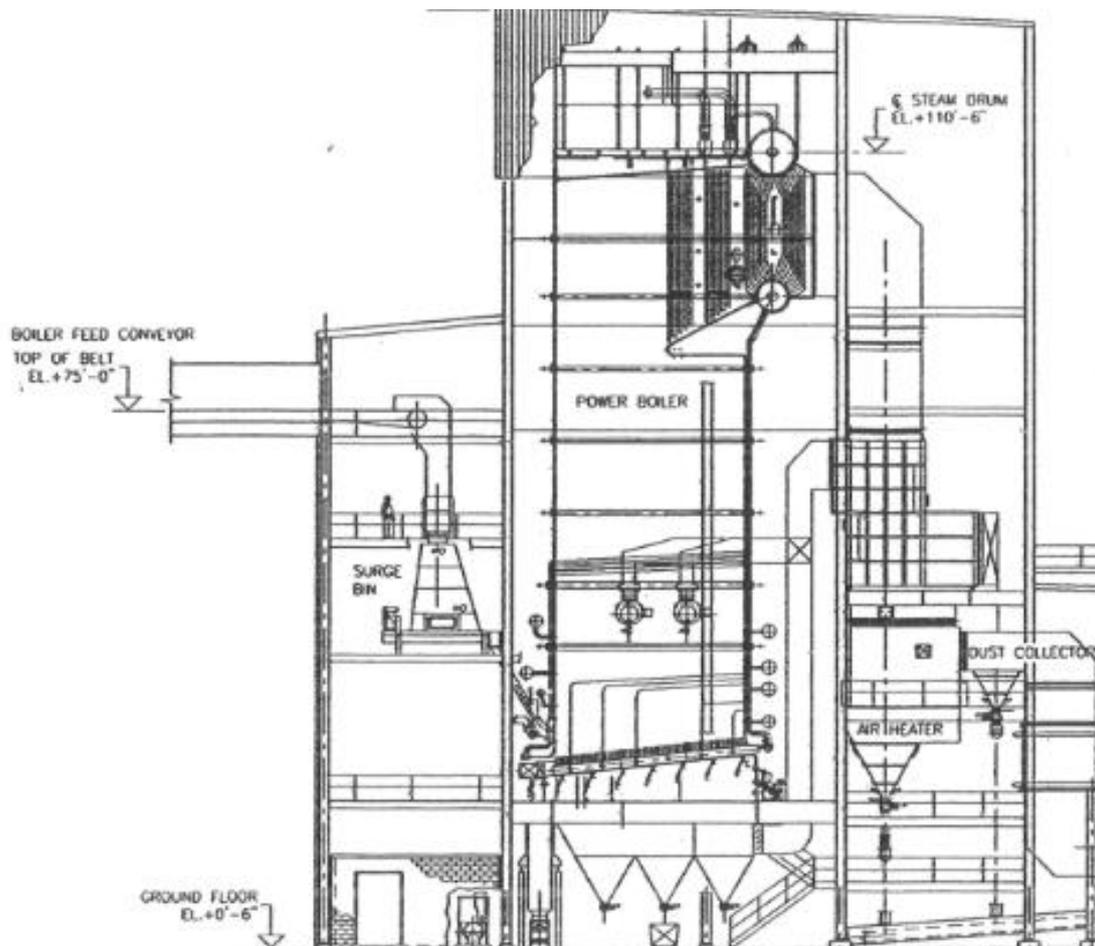
**Figura II.2:** Esquema de una caldera RETAL, (Fuente: Barroso et al., 2003).

En la tabla II.9 se muestran los principales parámetros de trabajo de un G.V de tipo RETAL de 45 t/h:

Tabla II.9: Parámetros de trabajo de un G.V tipo RETAL de 45 t/h, (Fuente: Elaboración propia).

Presión	1.9 MPa
Temperatura	320 °C
Producción de Vapor (Dv)	45 t/h
Temperatura agua alimentar (Taa)	80 °C
Consumo de combustible para el bagazo (Bc)	22 t/h
Consumo de bagazo para 50%	11 t/h
Consumo de RAC para 50%	6.15 t/h
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)	213.74 °C

La otra tecnología seleccionada es un generador del tipo VU-40, de alta presión, con una capacidad nominal de 213 t/h de vapor, un consumo aproximado de bagazo de 82.3 t/h. La presión y temperatura del vapor sobrecalentado son de 6.2 MPa a 455 °C (Figura II.3).



**Figura 2.3:** Esquema del generador de vapor VU-40 (Vilches, 2022)

En la tabla II.10 se muestran los principales parámetros de trabajo de un G.V de tipo VU-40 de 213 t/h

Tabla II.10 Parámetros de trabajo de un G.V tipo VU-40 de 213 t/h, Fuente: (Vilches, 2022)

Presión	6.2 MPa
Temperatura	455 °C
Producción de Vapor (Dv)	213 t/h
Temperatura agua alimentar (Taa)	137.8 °C
Consumo de combustible para el bagazo (Bc)	82.3 t/h
Coeficiente de exceso de aire a la salida de la caldera (alfa)	2
Coeficiente de exceso de aire a la salida del horno (alfa Ht)	1.8
Temperatura de salida de los gases (Tgs)	179.38 °C

### 2.3 Método energético y exergetico.

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 (Rodríguez, 2000). A continuación, se mostrará el procedimiento para determinar ambos métodos.

#### Método directo

Este método relaciona el calor utilizado la entalpía de los gases de salida  $I_{gs}$  y el calor disponible entregado durante la combustión de la masa de trabajo del combustible o poder calorífico inferior  $Q_i^t$ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_t = \frac{G_{\text{evap}}(I_{v,s} - I_{aa})}{Q_i^t * B_c} * 100 \quad \text{Ec 2.1}$$

El  $Q_i^t$  se determina por las ecuaciones 2.2 y 2.3 dependiendo del sistema de unidad

$$Q_i^t = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 24 * W^t \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.2}$$

$$Q_i^t = 80,9 * C^t + 246 * H^t - 26 * (O^t - S^t) - 5,7 * W^t \quad (\text{kcal/kg}) \quad \text{Ec 2.3}$$

#### Método indirecto

El cálculo de la eficiencia por el método de balance indirecto  $\eta_T$  se obtiene partiendo de la ecuación 2.4:

$$\eta_T = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) [\%] \quad \text{Ec 2.4}$$

Dónde,

$q_2$ : Porcentaje de las pérdidas por los gases de escape.

$q_3$ : Porcentaje de las pérdidas por incombustión química.

$q_4$ : Porcentaje de las pérdidas por incombustión mecánica.

$q_5$ : Porcentaje de las pérdidas por enfriamiento exterior.

$q_6$ : Porcentaje de las pérdidas por calor físico de la escoria.

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 las mismas.

#### 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:

$$q_2 = \frac{(I_{gsal} - \alpha_{gsal} I_{af}^0)(100 - q_4)}{Q_d^t} [\%] \quad Ec 2.5$$

Dónde,

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

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

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

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

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 2.2 y 2.3.

La entalpía de salida de los gases se determina por la ecuación 2.6:

$$I_{gs} = I_g^0 + I_{exc}^a + I_{\Delta V_{H_2O}} + I_{cen} \quad (kJ/kg) \quad Ec 2.6$$

Dónde,

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

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

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

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

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

$$I_g^0 = V_{RO_2} * (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 * (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (kJ/kg) \quad Ec 2.7$$

Donde,

$V_{RO_2}$ : Volumen de los gases triatómicos.

$(c\vartheta)_{RO_2}$ : Entalpía específica de los gases triatómicos (Anexo 1).

$V_{N_2}^0$ : Volumen teórico del nitrógeno.

$(c\vartheta)_{N_2}$ : Entalpía específica del nitrógeno (Anexo 1).

$V_{H_2O}^0$ : Volumen teórico del vapor de agua.

$(c\vartheta)_{H_2O}$ : Entalpía específica del vapor de agua (Anexo 1).

Para determinar las entalpías específicas anteriores es necesario determinar la temperatura de los gases de escape ( $T_{ge}$ ) mediante la ecuación 2.8.

$$T_{gs} = 172,32 + 24,76 * \alpha_H + \frac{43,22}{\sqrt{D_v}} - 0,213 * D_v \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Ec 2.8}$$

Donde,

$\alpha_H$ : Exceso de aire del horno.

$D_v$ : Generación de vapor (ton/h)

Los valores de  $V_{RO_2}$ ;  $V_{N_2}^0$  y  $V_{H_2O}^0$  son obtenidos por las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11:

$$V_{RO_2} = 1,866 * \frac{(C^t + 0,375 * S^t)}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.9}$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 * V_a^0 + 0,8 * \frac{N^t}{100} \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.10}$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 * H^t + 0,0124 * W^t + 0,025 * V_a^0 \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.11}$$

La entalpía del aire en exceso responde a la ecuación 2.12:

$$I_{exc}^a = (\alpha_c - 1)I_a^0 \quad \text{Ec 2.12}$$

$$I_a^0 = V_a^0(c\vartheta)_a \quad \text{Ec 2.13}$$

Donde,

$I_a^0$ : Entalpía del volumen teórico de aire necesario (kJ/kg).

$(c\vartheta)_a$ : Entalpía específica del aire (Anexo 1).

La entalpía del volumen de vapor de agua en exceso se determina por la ecuación 2.14:

$$I_{\Delta V_{H_2O}} = 0,016(\alpha_c - 1) * V_a^0 * (c\vartheta)_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.14}$$

Donde,

$V_a^0$ : Volumen teórico de aire ( $\text{m}^3\text{N/kg}$ ).

A su vez  $V_a^0$  depende de la composición del combustible y se calcula por la ecuación 2.15:

$$V_a^0 = 0,0889(C^t + 0,375 * S^t) + 0,265 * H^t - 0,0333 * O^t \quad (\text{m}^3\text{N/kg}) \quad \text{Ec 2.15}$$

Luego la entalpía de la ceniza se calcula a partir de la ecuación 2.16:

$$I_{cen} = (c\vartheta)_{cen} * \frac{A^t}{100} * a_{arr} \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.16}$$

Dónde,

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

$(c9)_{cen}$ : Entalpía específica de la ceniza (kJ/kg) (Anexo 2).

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:

$$A^E < 0,95$$

Dónde:

$A^E$  – Contenido de ceniza equivalente del combustible (% kg/MJ) y se obtiene por:

$$A^E = \frac{A^t}{Q_i^t} \quad (\% \text{ kg/MJ}) \quad \text{Ec 2.17}$$

Por último, la entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C se obtiene por la ecuación 2.18:

$$I_{af}^0 = 39,8 * V_a^0 \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Ec 2.18}$$

*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, así como 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 2.19.

$$G_{arr} = G_{arr}^c + G_{arr}^{ch} \quad \text{Ec 2.19}$$

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 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23, para finalmente despejar en la Ec 2.24 como se muestra a continuación:

$$q_4^{\text{esc}} = \frac{G_{\text{esc}} C_{\text{esc}} 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad \text{Ec 2.20}$$

$$q_4^f = \frac{G_f C_f 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad \text{Ec 2.21}$$

$$(q_4^{\text{arr}})^c = \frac{G_{\text{arr}}^c C_{\text{arr}}^c 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad \text{Ec 2.22}$$

$$(q_4^{\text{arr}})^{\text{ch}} = \frac{G_{\text{arr}}^{\text{ch}} C_{\text{arr}}^{\text{ch}} 1870}{B_c Q_i^t} [\%] \quad \text{Ec 2.23}$$

$$q_4 = q_4^{\text{esc}} + q_4^f + (q_4^{\text{arr}})^c + (q_4^{\text{arr}})^{\text{ch}} [\%] \quad \text{Ec 2.24}$$

El valor de  $G_{\text{arr}}^c$  se determina pesando la ceniza de los conductos de gases y embudos de la instalación. La magnitud  $G_{\text{arr}}^{\text{ch}}$  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  $G_{\text{esc}}$ ,  $G_f$ ,  $C_{\text{esc}}$ ,  $C_f$  y  $C_{\text{arr}}$ ; además conocer el porcentaje de la ceniza en la escoria  $A_{\text{esc}}$ , en el foso  $A_f$ , y en los arrastres  $A_{\text{arr}}$ .

En este caso  $G_{\text{arr}}$  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 2.25:

$$a_{\text{esc}} + a_f + a_{\text{arr}} = 100\% \quad \text{Ec 2.25}$$

Donde,

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

Los valores de  $a_{\text{esc}}$ ,  $a_f$  y  $a_{\text{arr}}$  se determinan por las siguientes fórmulas:

$$a_{\text{esc}} = \frac{A_{\text{esc}} G_{\text{esc}}}{A^t B_c} * 100 [\%] \quad \text{Ec 2.26}$$

$$a_f = \frac{A_f G_f}{A^t B_c} * 100 [\%] \quad \text{Ec 2.27}$$

Luego  $a_{\text{arr}}$  se obtiene despejando en la ecuación 2.25:

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 siguiente expresión:

$$G_{arr} = \left( \frac{A^t B_c}{A_{arr} 100} \right) a_{arr} \quad [\%] \quad \text{Ec 2.28}$$

Luego como en el método anterior  $q_4$  se determina por las ecuaciones 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23.

*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 2.29.

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_d^t} * 100 = \frac{Q_3}{Q_i^t} * 100 \quad [\%] \quad \text{Ec 2.29}$$

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

$$Q_3 = V_{CO} Q_{CO} + V_{H_2} Q_{H_2} + V_{CH_4} Q_{CH_4} + V_{C_m H_n} Q_{C_m H_n} \quad \text{Ec 2.30}$$

Donde,

$V_{CO}$ ,  $V_{H_2}$ ,  $V_{CH_4}$ ,  $V_{C_m H_n}$ : Volumen de los gases combustibles en los productos de la combustión; [m<sup>3</sup>N/kg].

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

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

$$Q_3 = \frac{(C^t + 0,375S^t)(0,236CO + 0,202H_2 + 0,668CH_4)}{1000(CO_2 + SO_2 + CO + CH_4)} \quad \text{Ec 2.31}$$

*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 2.32:

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

Ec 2.32

Donde,

$q_5^{\text{nom}}$ : Pérdida de calor por enfriamiento externo para capacidad nominal; (%) (ver Tabla II.11).

D: Capacidad de cálculo; (t/h).

Tabla II.11. Pérdida por enfriamiento exterior para calderas de vapor. Fuente: (Arias & Ponce, 2018)

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

*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 2.33:

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

Ec 2.33

Donde,

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

(ct)<sub>esc</sub>: Entalpía específica de la escoria; (kJ/kg).

Una vez determinadas todas estas pérdidas, se despejan en la ecuación 2.5 y se determina la eficiencia por el método indirecto.

### **Balance exerético**

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

Primeramente, se determina la exerética del agua suministrada mediante la ecuación 2.34.

$$e_{aa} = (h_{aa} - h_o) - T_o(s_{aa} - s_o) \quad \text{Ec 2.34}$$

Donde,

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

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

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

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

$s_{aa}$ : entropía del agua de alimentar; (kJ/kgK).

$s_o$ : entropía a las condiciones del estado de referencia; (kJ/kgK).

Luego se determina la exerética del agua de alimentar, se puede calcular a partir de la ecuación 2.35.

$$E_{aa} = m_{H_2O} * e_{aa} \quad \text{Ec 2.35}$$

Donde,

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

$m_{H_2O}$ : Flujo del agua de alimentar (kg/h)

Posteriormente se pasa a determinar la exerética del combustible utilizando la ecuación 2.36.

$$E_{\text{Combustión}} = m_{\text{Comb}} * Q_d \quad \text{Ec 2.36}$$

Donde,

$E_{\text{combustión}}$ : Exerética del combustible (kW)

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

Mediante la ecuación 2.37 se determina la exergía del combustible.

$$E_{\text{combustible}} = h_{\text{comb}} * m_{\text{Comb}} \quad \text{Ec 2.37}$$

Donde,

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

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

Luego utilizando las ecuaciones 2.38 y 2.39 se determina la exergía específica de los gases de escape y el flujo exergético de los gases de escape respectivamente.

$$m_{\text{ge}} = V_{\text{ge}} * \rho_{\text{ge}} * m_{\text{Comb}} \quad \text{Ec 2.38}$$

Donde,

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

$V_{\text{ge}}$ : Volumen específico de los gases de escape (m<sup>3</sup>/kg)

Donde,

$$V_{\text{ge}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^o + V_{\text{H}_2\text{O}}^o + (\alpha - 1) * V^o + 0,00161 * d(\alpha - 1) * V^o \quad \text{Ec 2.39}$$

$d$ : Humedad del aire (gramos de agua/kg de aire seco) determinada por las tablas psicométricas, generalmente en Cuba se toma  $d = 15\text{-}23 \text{ g}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$

$\alpha$ : coeficiente de exceso de aire a la salida

$\rho_{\text{ge}}$ : Densidad de los gases de escape (kg/m<sup>3</sup>)

$$E_{\text{ge}} = m_{\text{ge}} * C_p (T_{\text{ge}} - T_o) \quad \text{Ec 2.40}$$

Donde,

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

$C_p$ : Calor específico de los gases de escape (kJ/kgK) (Rein, 2012)

$$C_p = K_1 * T_{\text{ge}} + K_2 \quad \text{Ec 2.41}$$

Donde:

$K_1$

$$= -0.00000000186 * (\text{exceso de aire})^2 - 0.00000057 * \text{exceso de aire} \\ + 0.00014104$$

Ec 2.42

$K_2$

$$= -0.00000145 * (\text{exceso de aire})^2 + 0.00043002 * \text{exceso de aire} + 0.9332776 \quad \text{Ec 2.43}$$

Exceso de aire (%)

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

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

Luego se determina la exergía específica del vapor saturado y la exergía del vapor producido por la caldera mediante las ecuaciones 2.40 y 2.41 respectivamente.

$$e_{vs} = (i_{vs} - i_o) - T_o(s_{vs} - s_o) \quad \text{Ec 2.44}$$

Donde,

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

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

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

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

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

$$E_{vs} = m_{\text{vapor}} * e_{vs} \quad \text{Ec 2.45}$$

Donde,

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

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

Para determinar la pérdida de exergía en el generador de vapor durante el proceso de la combustión se utiliza la ecuación 2.42.

$$E_v^{\text{cal}} = (E_{aa} + E_{\text{combustión}} + E_{\text{Combustible}}) - (E_{vs} + E_{ge}) \quad \text{Ec 2.46}$$

Donde,

$E_v^{\text{cal}}$ : Pérdida de exergía en el generador de vapor (kW)

Finalmente, el rendimiento exergético del generador de vapor se determina por la ecuación 2.43.

$$\eta_{\text{exerg}}^{\text{gv}} = \frac{E_{\text{sal}}}{E_{\text{ent}}} \quad \text{Ec 2.47}$$

Donde,

$E_{ent}$ : Exergía de las entradas.

$E_{sal}$ : Exergía de las salidas.

$$\eta_{exerg}^{gv} = \frac{E_{vs} + E_{ge}}{E_{aa} + E_{combustión} + E_{Combustible}}$$

## 2.4 Conclusiones parciales

1. La formulación del método propuesto basado en balances energéticos, exergéticos permite determinar indicadores de eficiencia energética y calidad de la energía, específicamente dentro del proceso de combustión en un generador de vapor.

# Capítulo 3



# **CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO: PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN GENERADOR DE VAPOR VU-40 Y RETAL DE 45 T/H.**

## **3.1 Método energético**

Partiendo de la metodología descrita en el capítulo 2, para el análisis energético se evaluaron cinco variantes de combustión de biomasa, teniendo: Variante I (Combustión de 100% bagazo), Variante II (Combustión de 100% RAC), Variante III (Combustión 50% Bagazo y 50% RAC), Variante IV (Combustión 90 % Bagazo y 10% Marabú), Variante V (Combustión 90% RAC y 10% Marabú) con el objetivo de cuantificar las pérdidas que ocurren en el proceso de combustión y determinar la eficiencia en el proceso.

### **3.1.1 Determinación del poder calórico del combustible en las distintas variantes.**

El poder calórico se obtiene según la Ec 2.2 y haciendo uso de las Tablas II.3, II.4 y II.7.

Tabla III.1 Poder Calórico Inferior de los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

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

### **3.1.2 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para los combustibles**

Los volúmenes teóricos se obtienen cuando se quema 1 kg de combustible con la cantidad de aire teóricamente necesaria ( $\alpha = 1$ ).

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 2.15, 2.9, 2.10 y 2.11 respectivamente para el caso de la combustión de las distintas variantes. La tabla III.2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla III.2: Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

Combustible (Variantes)	Volúmenes teóricos de los combustibles			
	V°RO <sub>2</sub>	V°N <sub>2</sub>	V°H <sub>2</sub> O	V°a
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

### 3.1.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles

La determinación de la característica equivalente para el contenido de ceniza fue a partir de la ecuación 2.17 y en la tabla III.3 se muestra los resultados para los diferentes tipos de combustibles.

Tabla III.3: Contenido equivalente de ceniza para los combustibles. Fuente: Elaboración Propia.

Contenido equivalente de ceniza A <sup>E</sup> (% kJ/kg)	
Bagazo	0,07
RAC	0,45

Si se realiza la comparación expuesta en el capítulo anterior ( $A^E < 0,95$ ) se observa que el bagazo y el RAC cumplen la condición de bajo contenido de cenizas, el marabú presenta 0 % de contenido de ceniza en su análisis inmediato, ver Tabla II.8, por lo que no es necesario tenerla en cuenta en el cálculo de la entalpia en ninguna de las variantes de combustibles que se analizan.

### 3.1.4 Determinación del coeficiente exceso de aire a la salida del horno y del generador de vapor

Según Barroso (2003),  $\alpha_c$ , para este caso, puede ser calculado como:

$$\alpha_c = \alpha_H + \Delta\alpha$$

Ec 3.1

Dónde,

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

$\Delta\alpha$ : Infiltraciones de aire.

Las infiltraciones de aire, para la capacidad nominal de generación de las calderas o generadores de vapor ( $D_{nom}$ ), fueron estudiadas y calculadas por Barroso (2003) en su investigación presentando un valor constante de 0,2.

Según Barroso (2003), en su investigación, el exceso de aire en el horno para la quema de bagazo en parrilla ( $\alpha_{Hp}$ ) se representa con valores como 1,3 y 1,6 pero, como el autor propiamente también añade, está demostrado que en la práctica este valor llega a ser superior, por ello se utilizará un valor de 1,8 para el cálculo y utilizando la Ec 3.1 el exceso de aire en la caldera es de 2,0.

### 3.1.5 Determinación de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire

Para determinar las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire primeramente se determina la temperatura de los gases de escape mediante la ecuación 2.8 y luego se utiliza el Anexo 1 para hallarlas. En la tabla III.4 se muestran los valores de dichas entalpías.

Tabla III.4 Entalpías específicas de los productos de la combustión y el aire en (kJ/kg).

Fuente: Elaboración propia.

Productos de la combustión	kJN/m3
(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

### 3.1.6 Determinación de las entalpías de los gases de salida y del aire frío

Para calcular las diferentes entalpías se utilizan las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.12, 2.13, 2.14, 2.18 para la combustión de bagazo y de RAC y los porcentos de mezcla para las demás Variantes. En la tabla III.5 se muestran los valores de las entalpías.

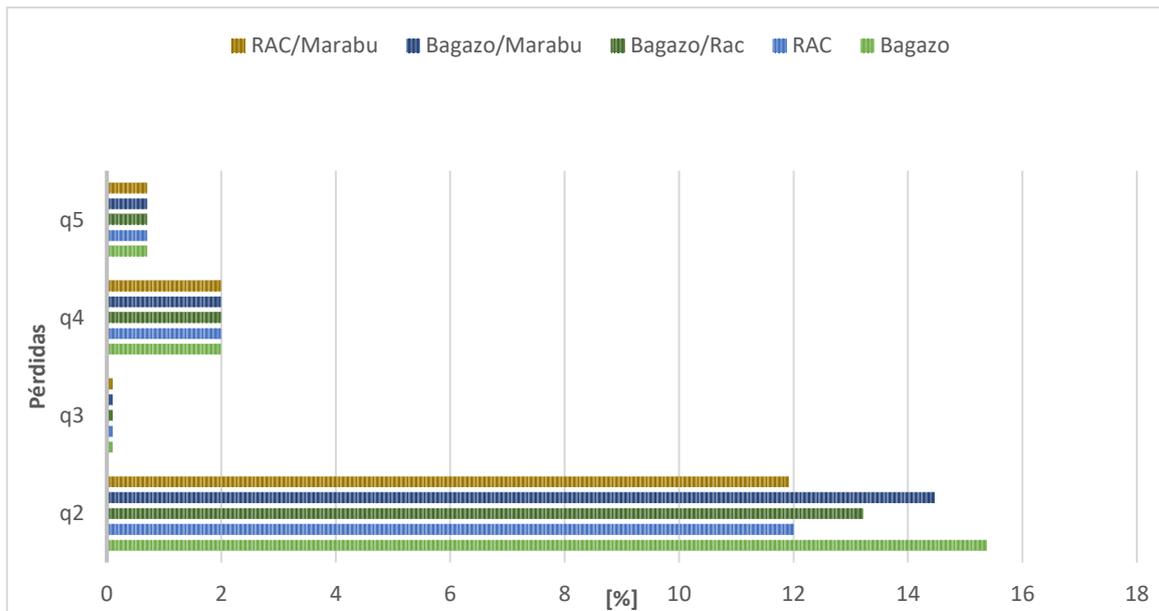
Tabla III.5 Entalpías para las diferentes variantes de combustible (kJ/kg). Fuente:  
Elaboración propia.

Variantes	I	II	III	IV	V
Entalpía de los gases de salida ( $I_{gs}$ )	1 324,14	1 878,19	1 601,17	1 361,32	1 875,43
Entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C ( $I_{af}^0$ )	84,44	133,16	108,80	89,44	133,29
Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión ( $I_g^0$ )	804,92	1 059,36	932,14	826,83	1 055,83
Entalpía del aire en exceso ( $I_{exc}^a$ )	509,99	804,25	657,12	524,70	805,01
Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso ( $I_{\Delta H_2O}$ )	9,24	14,57	11,91	9,79	14,59
Entalpía del volumen teórico de aire necesario ( $I_a^0$ )	509,99	804,25	657,12	540,17	805,01

### 3.1.7 Determinación de las pérdidas mediante la combustión

La pérdida por 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 2, en una caldera tipo VU-40, para el caso de las biomásas estudiadas se puede apreciar que la Variante I presenta mayores pérdidas con 15.38 %, seguido de la Variante IV con 14,47 %, la Variante III con 13.20 %, la Variante II con 11.99 % y en el caso de la Variante V se registra la menor pérdida  $q_2$  con 11.91 %; ver Figura III.1

Las demás pérdidas debido a la falta de datos no fueron determinadas por la metodología expuesta en el capítulo II, sin embargo, para el caso de estudio 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 ( $q_5$ ), ver Tabla III.6, todas estas pérdidas se pueden apreciar en la figura III.1 donde se evidencia que las mayores corresponden a las pérdidas por los gases de escape.

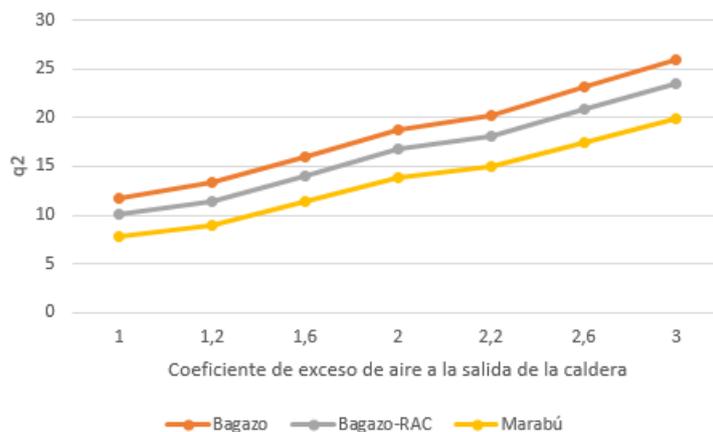


**Figura III.1:** Pérdidas por biomasa en el proceso de combustión en una caldera tipo VU-40. (Fuente: Elaboración propia).

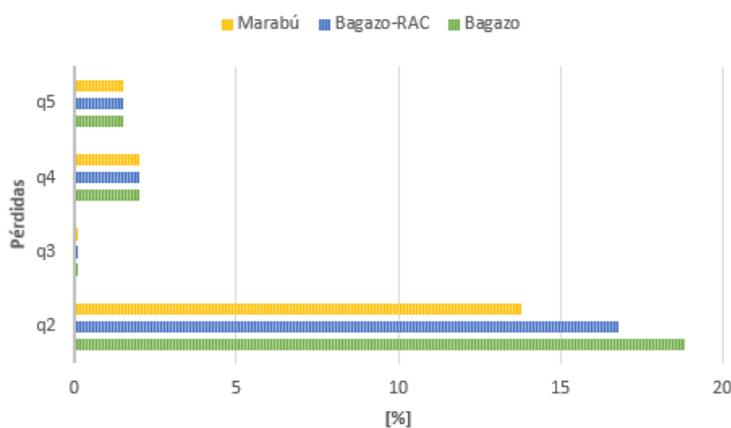
Tabla III.6 Pérdidas en el proceso de la combustión para las diferentes variantes de combustibles (%). Fuente: Elaboración propia.

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

Por otro lado, se puede apreciar como el valor de  $q_2$ , en una caldera tipo RETAL de 45 t/h, es directamente proporcional al coeficiente de exceso de aire, para el caso de las biomásas estudiadas se puede apreciar que la Variante I presenta mayores pérdidas (18,83 %) un 1,2% superior para el caso de esta tecnología, mientras que en el caso de la Variante V se registra la menor pérdida  $q_2$  (13,78 %), un 1,15 % inferior para este caso.



**Figura III.2:** Valores de las pérdidas por los gases de escape en función del coeficiente de exceso de aire, (Fuente: Elaboración propia).



**Figura III.3:** Pérdidas por biomasa en el proceso de combustión en una caldera tipo RETAL de 45 t/h, (Fuente: Elaboración propia).

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

Se determina la eficiencia energética empleando cada una de las Variantes, con el objetivo de conocer las eficiencias de cada una de las combinaciones analizadas, empleando ambos métodos, directo Ec. 2.1 e indirecto Ec 2.4, en la figura III.4 se presentan los resultados obtenidos.

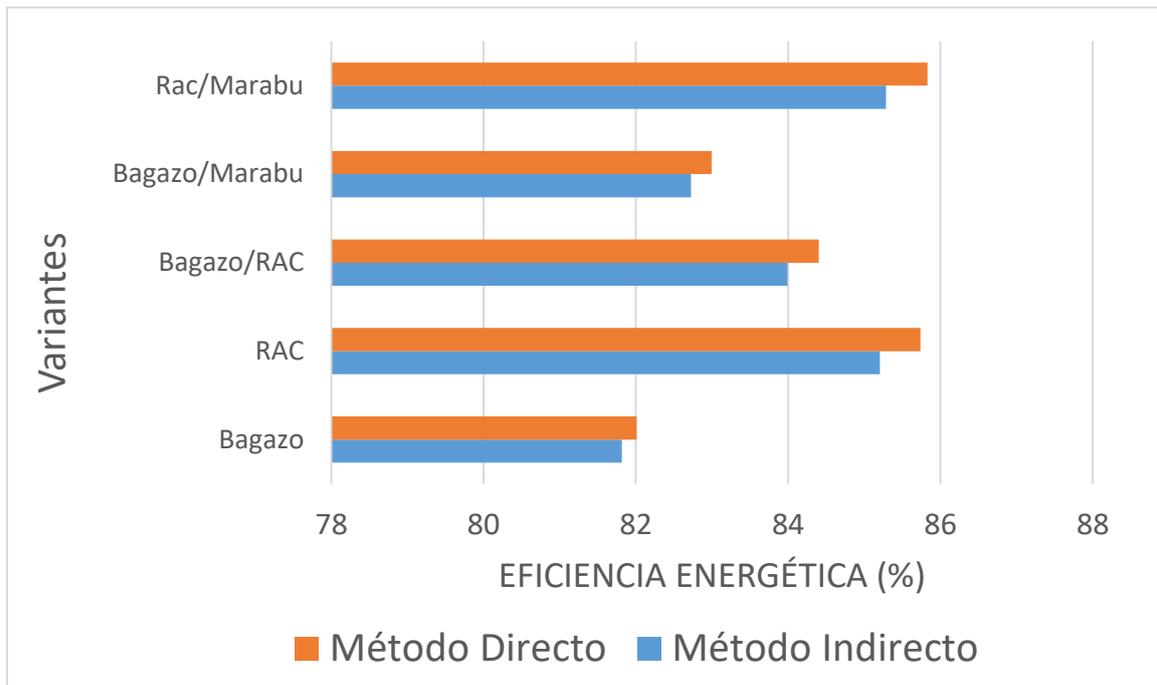


Figura III.4 Valores de eficiencia energética por ambos métodos en % de las distintas biomazas. Fuente: Elaboración propia.

El balance energético presentó que la eficiencia calculada por el método directo es mayor que la calculada por el método indirecto, ya que esta última toma en consideración un número de pérdidas ( $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$  y  $q_5$ ). Los valores más bajos de eficiencia para la combustión en el generador de vapor tipo VU-40, como se observa en la figura III.4, los representa la Variante I con un 82,00 % por el método indirecto y con un 81,00 % por el método directo los valores más altos los representa la Variante V (RAC/MARABU) con un 85,28 % y 85,82 % respectivamente; resultados similares a los reportados por (J. P. Guerra, Cardoso, Nogueira, & Kulay, 2020), las calderas bagaceras de alta presión presentan rendimientos entre 77 – 88 %.

(Cruz, Colombres, Golato, Morales, & Paz, 2013) en su trabajo plantean que la eficiencia energética en una caldera similar de alta presión con parámetros de producción de vapor nominal y presión de 118t/h y 5,0 MPa respectivamente, presenta eficiencias de alrededor del 77% y logra obtener mediante métodos de secaderos de bagazo rendimientos de hasta 86%.

El balance energético para el caso de la variante I considerando el generador de vapor tipo RETAL presentó una eficiencia de 77,57 % por el método indirecto y con un 78,49 % por el método directo, resultados similares a los reportados por Cortés et al., (2019), Barroso et al., (2003) y Rubio, (2019); pero ligeramente inferiores a los obtenidos en la para la tecnología VU-40.

Franck et al., (2011), en su trabajo plantean que la eficiencia energética en calderas bagaceras que trabajan a bajas presiones están en el rango de 73 – 75 %, mientras que otras a pesar de tener infiltraciones de aire en el precalentador pueden alcanzar una eficiencia de 77,3 %; Cortés et al., (2019) en su trabajo al evaluar el sistema energético y de circulación de agua de la Central Azucarero Quintín Bandera, obtuvo que la eficiencia energética en una caldera bagacera es del 78 %, resultado similar al obtenido en el análisis realizado, Barroso et al., (2003) expone que la eficiencia en calderas de bagazo puede ser de 77,9 %; Rubio, (2019) en su estudio señala que las máximas eficiencias alcanzadas en este tipo de calderas están en el orden del 76 – 80 %,

Tabla III.7 Valores de eficiencia energética y bibliografía consultada, (Fuente: Elaboración propia).

Eficiencia Energética [%]	Fuente
77-88	(Guerra et al., 2020)
86	(Franck et al., 2019)
76 – 80	(Rubio, 2019)
77,9	(Barroso et al., 2003)

### 3.2 Análisis exergetico

Los pasos a seguir para el análisis exergetico al igual que para el energético se evaluaron para una caldera de tipo VU-40 y RETAL considerando todas las Variantes combustibles, con el propósito de conocer el valor de su eficiencia exergetica. En este epigrafe se muestran todos los cálculos para el balance exergetico.

#### 3.2.1 Determinación de las entalpías y entropías de las entradas y salidas.

Con la ayuda del software Chemical Logic Steam Tab Companion (CLSTC) se determinaron los diferentes valores de entalpías, entropías y las condiciones de los gases de escape, partiendo de los parámetros de la tecnología de aprovechamiento y la composición de las biomásas. En las tablas III.8, III.9 y III.10 se muestran los valores de entalpía, entropía y las condiciones de los gases de escape respectivamente.

Tabla III.8 Entalpías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente:  
Elaboración propia a partir de los datos del Software CLSTC.

Entalpías (kJ/kg)	
Entalpía del agua alimentar ( $h_{aa}$ )	579,73
Entalpía a las condiciones de referencia ( $h_o$ )	125,73
Entalpía del vapor saturado ( $l_{vs}$ )	2 757,56
Entalpía (100% Bagazo)	7 360,95
Entalpía (100% RAC)	13 169,97
Entalpía (50% Bagazo, 50% RAC)	10 265,19
Entalpía (90% Bagazo, 10% Marabú)	8 006,47
Entalpía (90% RAC, 10% Marabú)	13 235,08

Tabla III.9 Entropías de las diferentes entradas y salidas del sistema. Fuente:  
Elaboración propia a partir de los datos del Software CLSTC.

Entropías (kJ/kgK)	
Entropía del agua de alimentar ( $S_{aa}$ )	1,72
Entropía a las condiciones de referencia ( $S_o$ )	0,44
Entropía del vapor saturado ( $S_{vs}$ )	6,75

Para la determinación de las condiciones de los gases de escape empleamos la Ec. 2.39, Ec. 2.41, ver Tabla III.10

Tabla III.10 Condiciones de los gases de escape. Fuente: Elaboración propia.

Variantes	I	II	III	IV	V
Densidad de los gases de escape (kg/m <sup>3</sup> )	0,20	0,14	0,27	0,31	0,26
Volumen específico de los gases de escape (m <sup>3</sup> /kg)	4,80	6,78	3,63	3,20	3,83

Calor específico de los gases de escape (kJ/kgK)	0,99
--------------------------------------------------	------

### 3.2.2 Determinación de las exergías específicas

Para determinar las exergías específicas del agua alimentar, de los gases de escape y del vapor saturado se utilizaron las ecuaciones 2.34, 2.38 y 2.40 respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla III.11.

Tabla III.11 Exergías específicas en kJ/kg. Fuente: Elaboración propia.

Agua de alimentar ( $e_{aa}$ )	66,07
Gases de escape ( $m_{ge}$ )	82 300,00
Vapor saturado ( $e_{vs}$ )	718,52

### 3.2.3 Determinación de las exergías de entrada y salida

Partiendo de las exergías específicas calculadas anteriormente utilizando las ecuaciones 2.35, 2.36, 2.37, 2.39 y 2.41 se calcula la exergía del agua alimentar, de la combustión, 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, en la tabla III.12 se muestran los valores de las exergías calculadas.

Tabla III.12 Exergía en kJ/h de entrada y salida del sistema para la Variante I (100% Bagazo). Fuente: Elaboración propia.

Variante I (100% Bagazo)	
Exergía del agua alimentar ( $E_{aa}$ )	14 087 005,4
Exergía de los gases de escape ( $E_{ge}$ )	12 268 501,3
Exergía del vapor producido por la caldera ( $E_{vs}$ )	153 188 257,0
Exergía combustible	605 760 920,0

Tabla III.13 Exergía en kJ/h de entrada y salida del sistema para la Variante II (100% RAC). Fuente: Elaboración propia.

Variante II (100% RAC)	
Exergía del agua alimentar ( $E_{aa}$ )	14 087 005,4
Exergía de los gases de escape ( $E_{ge}$ )	12 268 501,3
Exergía del vapor producido por la caldera ( $E_{vs}$ )	153 188 257,0
Exergía combustible	1 083 888 531,0

Tabla III.14 Exergía en kJ/h de entrada y salida del sistema para la Variante III (50% Bagazo, 50% RAC). Fuente: Elaboración propia.

Variante III (50% Bagazo, 50% RAC)	
Exergía del agua alimentar ( $E_{aa}$ )	14 087 005,4
Exergía de los gases de escape ( $E_{ge}$ )	12 268 501,3
Exergía del vapor producido por la caldera ( $E_{vs}$ )	153 188 257,0
Exergía combustible	844 824 726,0

Tabla III.15 Exergía en kJ/h de entrada y salida del sistema para la Variante IV (90% Bagazo, 10% Marabú). Fuente: Elaboración propia.

Variante IV (90% Bagazo, 10% Marabú)	
Exergía del agua alimentar ( $E_{aa}$ )	14 087 005,4
Exergía de los gases de escape ( $E_{ge}$ )	12 268 501,3
Exergía del vapor producido por la caldera ( $E_{vs}$ )	153 188 257,0
Exergía combustible	658 932 069,5

Tabla III.16 Exergía en kJ/h de entrada y salida del sistema para la Variante V (90% RAC, 10% Marabú). Fuente: Elaboración propia.

Variante V (90% RAC, 10% Marabú)	
Exergía del agua alimentar ( $E_{aa}$ )	14 087 005,4
Exergía de los gases de escape ( $E_{ge}$ )	12 268 501,3
Exergía del vapor producido por la caldera ( $E_{vs}$ )	153 188 257,0
Exergía combustible	1 089 246 919,0

### 3.2.4 Determinación de las pérdidas y eficiencia exergética

Una vez obtenidas las exergías de las entradas y las salidas se determinan las pérdidas y la eficiencia exergética a partir de la ecuación 2.42 y 2.43 respectivamente. En la tabla III.17 se muestran los valores de pérdidas y eficiencia evaluados para el caso del generador de vapor VU-40.

Tabla III.17: Valores de pérdidas y de eficiencia exergética para la combustión en el generador de vapor VU-40, (Fuente: Elaboración propia).

Variantes	Pérdida de exergía en el generador de vapor [kJ/h]	Eficiencia exergética del generador de vapor [%]
I (100% Bagazo)	454 391 167,5	26,69
II (100% RAC)	932 518 778,5	15,06
III (50% Bagazo, 50% RAC)	693 454 973,0	19,26
IV (90% Bagazo, 10% Marabú)	507 562 317,0	24,58
V (90% RAC, 10% Marabú)	937 877 166,9	14,99

Como se puede observar en la Tabla III.17 los valores menores de pérdidas los representa la Variante I (454 391 167,5 kJ/h), ocasionando una disponibilidad o una eficiencia exergética de 26,69 %, sin embargo, la Variante V presenta los valores más altos de pérdidas (937 877 166,9 kJ/h) y presenta una eficiencia exergética de 14,99 %.

El diagnóstico exergético de (Kamate & Gangavati, 2009) arroja un rango de obtención de eficiencia exergética del generador de vapor de 21 – 35,7%, utilizando intervalos de valores de presión y temperatura del generador de 2 – 11 MPa y 340 – 545 °C, con la utilización de turbinas de vapor a contrapresión para obtener energía eléctrica, demostrando que dentro del sistema el elemento con menos eficiencia exergética es el generador de vapor.

(Echeverry Arbeláez, 2017) realizó el análisis exergético a un generador de vapor empleando bagazo y carbón, en la que se identificaron las zonas más críticas que generan una gran cantidad de exergía destruida, los resultados de su estudio plantean que la eficiencia exergética fue de un 22 %. La Tabla III.18 presenta un resumen de los resultados en la literatura, así como la bibliografía consultada para la obtención de los mismos.

Tabla III.18 Valores de eficiencia exergética y bibliografía consultada, (Fuente: Elaboración propia).

Eficiencia exergética [%]	Bibliografía consultada
21-35,7	(Kamate & Gangavati, 2009)
23,2	(Fals, Loret de Mola & Cervantes, 2010)
22	(Echeverry Arbeláez, 2017)

Para el caso de la combustión en el generador de vapor tipo RETAL, los valores menores de pérdidas los representa la Variante V (46 629 794,3 kJ/h), ocasionando una disponibilidad o una eficiencia exergética de 46,59 %, sin embargo, la Variante I presenta los valores más altos de pérdidas (118 369 171 kJ/h) y presenta una eficiencia exergética de 28,36 %.

El diagnóstico exergético de Marín, González & Mestizo, (2007) arroja una eficiencia exergética de 18,4 %, siendo las mayores pérdidas debidas a la irreversibilidad por combustión, plantean, además que esta eficiencia se halla dentro del límite inferior de las bases de datos especializadas en calderas bagaceras; Fals, Loret de Mola & Cervantes, (2010), en su investigación demostraron que el subsistema caldera bagacera analizado tiene una eficiencia exergética del 19,2 % y es aquí donde se producen las mayores irreversibilidades, este valor de eficiencia es provocado por malas operaciones, que trae por consecuencia elevadas temperaturas de los gases de escape, en su variante futura plantea que esta eficiencia puede llegar a alcanzar hasta un 23,2 %;

Sanz, (2014) expresa que la eficiencia exergética y la potencia eléctrica de salida son máximas cuando se incrementa la presión y temperatura de generación de vapor en la caldera, pudiéndose alcanzar en el caso de estudio una eficiencia de 29,21 %, resultado muy similar al del estudio realizado. Vásquez, (2017) plantea que la eficiencia exergética en una planta azucarera en San Jacinto fue de 23,2 % y demostró que utilizando el bagazo residual en gasificación de bagazo para generar gas de síntesis y utilizarlo en un ciclo combinado para producción de energía eléctrica, es más eficiente que del modo convencional y se logra incrementar la eficiencia exergética y energética de la planta de cogeneración. Echeverry, (2017) realizó el análisis exergético a una caldera de bagazo y carbón, en la que se identificaron las zonas más críticas que generan una gran cantidad de exergía destruida, los resultados de su estudio plantean que la eficiencia exergética fue de un 22 %. La Tabla III.2 presenta un resumen de los resultados en la literatura, así como la bibliografía consultada para la obtención de los mismos.

### **3.3 Conclusiones parciales del capítulo**

1. El balance energético considerando el generador de vapor tipo VU-40 presentó que la eficiencia calculada por el método directo es mayor que la calculada por el método indirecto, ya que esta última toma en consideración un número de pérdidas. Los valores más bajos de eficiencia los representa la Variante I (100% Bagazo) con un 82,00 % por el método indirecto y con un 81,00 % por el método directo, los valores más altos los representa la Variante V (90% RAC-10% MARABU) con un 85,28 % y 85,82 % respectivamente.
2. El balance exergético presentó que los menores valores de pérdidas los representa la Variante I (100% Bagazo) (454 391 167,5 kJ/h), ocasionando una disponibilidad o una eficiencia exergética de 26,69 %, sin embargo, la Variante V presenta los valores más altos de pérdidas (937 877 166,9 kJ/h) con una eficiencia exergética de 14,99 %.
3. El balance energético considerando la tecnología Retal presentó que la eficiencia calculada para la Variante I fue de un 77,57 % por el método indirecto y 78,49 %, las mayores eficiencias se contabilizan en la Variante V, siendo estas, 82,62 % por el método indirecto y de 83,99 % por el método directo.
4. El balance exergético demostró que la más alta eficiencia exergética (46,59 %), fue para el caso de la Variante III, mientras que para el caso de la Variante I la eficiencia exergética o disponibilidad fue de un 28,36 %, presentando el valor más bajo de los casos analizados.

# Conclusiones



## CONCLUSIONES GENERALES

1. El uso y el empleo de la biomasa, así como otras fuentes de energías renovables para la producción de energía térmica aplicada en distintas tecnologías como generadores de vapor y hornos son alternativas tecnológicas que apoyan la conciencia medioambiental. En la actualidad la biomasa a nivel mundial tiene una participación del 14 %, en el consumo total de energía siendo aun predominante la utilización de los combustibles sólidos. En Cuba la utilización de las FRE, es muy baja, pues produce solo un 4,3 % de la electricidad
2. La implementación de los balances de energía y exergía en la producción de vapor, permite un uso adecuado en el aprovechamiento energético, así como en la evaluación de las pérdidas energéticas aplicándolo a procesos de cogeneración. La formulación del método propuesto en este estudio basado en balances energéticos y exergéticos permite determinar indicadores de eficiencia energética y calidad de la energía, específicamente dentro del proceso de combustión en un generador de vapor.
3. El balance energético considerando el generador de vapor tipo VU-40 presentó que la eficiencia calculada por el método directo es mayor que la calculada por el método indirecto. Los valores más bajos de eficiencia los representa la Variante I (100% Bagazo) con un 82,00 % por el método indirecto y con un 81,00 % por el método directo, los valores más altos los representa la Variante V (90% RAC-10% MARABU) con un 85,28 % y 85,82 % respectivamente.
4. El balance exergético presentó que los menores valores de pérdidas los representa la Variante I (100% Bagazo) (454 391 167,5 kJ/h), ocasionando una disponibilidad o una eficiencia exergética de 26,69 %, sin embargo, la Variante V presenta los valores más altos de pérdidas (937 877 166,9 kJ/h) con una eficiencia exergética de 14,99 %.
5. El balance energético considerando la tecnología Retal presentó que la eficiencia calculada para la Variante I fue de un 77,57 % por el método indirecto y 78,49 %, las mayores eficiencias se contabilizan en la Variante V, siendo estas, 82,62 % por el método indirecto y de 83,99 % por el método directo. El balance exergético demostró que la más alta eficiencia exergética (46,59 %), fue para el caso de la Variante V, mientras que para el caso de la Variante I la eficiencia exergética o disponibilidad fue de un 28,36 %.

# Recomendaciones

## **RECOMENDACIONES**

1. Ampliar el estudio considerando aplicar el método emergético y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como técnicas para cuantificar el impacto ambiental de estas variantes de biomasa dentro del proceso de combustión.

# Bibliografía



## BIBLIOGRAFÍA

- Renewable capacity statistics 2020*. (2020). IRENA.
- Álvarez, A. M. (2016). Retos de América Latina: Agenda para el Desarrollo Sostenible y Negociaciones del siglo xxi *Problemas del Desarrollo*, 186(47).
- Badii, M. H., Guillen, A. & Abreu, J.L. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía. *International Journal of Good Conscience*, 11(1).
- Barrios Hernández, D. (2018). *Algunas aproximaciones a la base conceptual del almacenamiento de biomasa cañera* (Trabajo de diploma). Universidad de Las Villas
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. & Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82, 1451 – 1463.
- Bonomi, A., Cavalett, O., da Cunha, M. P. & Lima, M. (2016). Virtual Biorefinery, An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization. (Primera edición). *Springer*.
- Bravo Hidalgo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba *Centro Azúcar*, 42.
- 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 del Cauca*. (Trabajo de diploma) Universidad de Santo Tomás
- BUN-CA. (2002). *Biomasa. Primera edición San José. Costa Rica*.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (Séptima edición) McGraw Hill
- 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.
- Cuba, Grupo Estatal de Biomasa Cañera (GEBC). (2016). In *Incremento de generación con biomasa cañera*.: Documento interno de AZCUBA.
- Cuba, Aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la agricultura cubana. (2018). In. In M. D. L. A. Ministerio de la Agricultura. (MINAG)
- Dincer, I. & Rosen, M. (2007). EXERGY. Energy, Environment and Sustainable Development. *United States: Elsevier*.
- Echeverry Arbelaez, A. (2017). *Análisis exérgico y termoecológico de una caldera acuotubular de bagazo y carbón en un Ingenio Azucarero del Valle del Cauca* (Trabajo de diploma) Universidad Autónoma de Occidente
- Enguix Domenech, I. (2012). *Balance energético y económico para el aprovechamiento de biomasa forestal en el término municipal de Enguera*. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Valencia
- 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.
- 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. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*, 88(2), 41 - 49.
- Frómata Carbó, Y. (2010). *Diagnóstico energético de los generadores de vapor del Complejo Agroindustrial Dos Ríos*. (Tesis doctoral) Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- García Rodríguez, Y., López Hervis, Yoney & Benítez Hernández, Agustín. (2014). Optimización del sistema energético de un central azucarero para maximizar el excedente de bagazo *Revista Avanzada Científica*, 17(1).
- Ghaderi, H., Pishvae, M.S. & Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization oriented review and analysis. *Ind. Crops Prod*, 94, 972 - 1000. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>
- 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. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán*, 85(2), 17 - 31.
- Guerra, R. (2016). *Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017*.
- Hernández, B. (2018). *Oportunidades de inversiones en Bioeléctricas*. La Habana.
- Hernández, C. J., Nápoles García, M., de L. de La Cruz Aragoneses, M. & Rivera Martín, A. (2012). Evaluación energética de la empresa Mielera Siboney *Tecnología Química*, XXXII, (2).
- Jiménez Borges, R., Madrigal Monzón, J. A., Lapido Rodríguez, M. J. & Vidal Moya, D. A. (2016). Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor *Ingeniería Energética*, XXXVII, (2), 135 - 143
- Jiménez, R., López E. J., González F. & Curbelo J. A. (2017). Metodología para la estimación del potencial de biomasa en Cienfuegos con fines energéticos. *Revista de Investigaciones*, 10(2).
- Kirillin, V. A., Sichev, V. V. & Sheindlin, A. E. (1986). *Termodinámica técnica* (Segunda edición). Moscú.
- Marín Hernández, J. J. (2003). Aplicación del método exérgico y la tecnología pinch para determinar irreversibilidades en calderas bagaceras. *Centro Azúcar*, 30, 96.
- Marín Hernández, J. J., González Petit Jean, M. L. & Mestizo Cerón, J. R. (2007). Aplicación del método exérgico para determinar pérdidas separadas e irreversibilidades en calderas bagaceras. 8 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica
- Pacios Puig, A. (2018). *Metodología para el análisis energético, exérgico y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía* (Tesis de grado) Universidad de Cienfuegos
- Páez Rojas, D. Z. *Análisis situacional para el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales del subsector de frutas y verduras en Colombia en torno a los*

*principios del desarrollo sostenible* (Trabajo de diploma) Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

- Pérez de Alejo Victoria, H. E., Perez González, A., Corrales Valdés, Y., Pérez Ones, O., Curbelo Gómez, T., González González, Y., Goza León, O. & Marrero Águila, R. (2009). *El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos*. Editorial Universitaria (Cuba).
- Pérez Garay, L. (1986). *Generadores de Vapor*. La Habana
- Pérez Ramos, L. D. (2014). *Integración de procesos y análisis de cogeneración en las producciones de azúcar y alcohol* (Trabajo de diploma) Universidad de las Villas
- Rajput, R., K. (2007). *Engineering Thermodynamics New Delhi: Laxmi Publications (P) LTD., 3*.
- Ríos Álvarez, Y. (2017). *Perspectivas de generación eléctrica de la Empresa Azucarera de Villa Clara en el 2030 y vías para su incremento*. (Trabajo de diploma). Universidad de Las Villas
- Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. & Martínez, P. B. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*. Academia.
- Rodríguez Arias, A. D., Rosabal Ponce, Liz Belkis (2017). Tecnología de las secciones de paso en rotación para la quema eficiente del meollo en las calderas de bagazo. *Revista Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 7(3), 78-101.
- Rodríguez Gámez, M. (2011). *La ordenación y la planificación de las fuentes renovables de energía en la isla de cuba desde una perspectiva territorial. Estudio de caso en el municipio de guama a partir de un geoportal*. (Trabajo de diploma) Universidad Pablo de Olavide
- Rojas Wang, J. P. (2015). La sostenibilidad energética. *Éxito empresarial*, (289).
- Rubio, A. (2015). *Generadores de Vapor. Funcionamiento y Explotación*. Feijóo
- Rubio González, A., Roque Díaz, P. & Pérez Egusquiza, F. (2006). Estado del arte en la cogeneración de electricidad en la industria de la caña de azúcar. Primeros pasos hacia una industria sucroenergética. *Centro Azúcar*, (2).
- Rubio González, A. & Rubio Rodríguez, Manuel (2018). Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad. *Centro Azúcar*, 45(4), 20 - 31.
- Rubio González, A., Hernández Martínez, B. & Rubio Rodríguez, M. (2018). Programa cubano para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera para la generación de electricidad. *Revista ATAC*, 79(1).
- Rubio González, A. (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, Pedro, Palmero Marín, Delvis & Viera Rodríguez,

- Adineisy (2019). Propiedades del marabú, *Dichrostachys cinerea* (L.), como combustible, cosechado mediante máquinas.
- Sacramento Rivero, J. C., Romero, G., Cortés Rodríguez, E., Pech, E. & Blanco Rosete, S. (2010). Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México. *Ing. Química*, 9(3), 261-283.
- Saidur, R. et al. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262-2289.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Sánchez, J. (2017). Energía biomasa, ventajas y desventajas. [www.enbuenasmanos.com/Cuidado del medio ambiente/Energías renovables](http://www.enbuenasmanos.com/Cuidado-del-medio-ambiente/Energias-renovables).
- Sanz Amaya, D. (2014). *Análisis y optimización exergética de una planta de cogeneración para la industria azucarera* (Tesis de Maestría) Universidad Tecnológica de Pereira]. Pereira.
- Torres, J. (2007). *La biomasa cañera y el tránsito en cuba hacia una energética sustentable*. Palacio de Convenciones. La Habana, Cuba.
- Van Ness, H. A., M (2008). *Thermodynamics Perry's Chemical Engineer's Handbook. United States: McGraw-Hill.*, 8, 4.
- Vásquez Acuña, L. A. (2017). *Predecir mediante el análisis exergético la tecnología adecuada de cogeneración para la optimización de la planta azucarera San Jacinto* (Tesis de grado) Universidad Nacional del Santa
- Vizcón Toledo, R. (1997). *Determinación de coeficientes y recomendaciones para el diseño del sobrecalentador de vapor convectivo en calderas bagaceras* (Tesis doctoral) Universidad de Matanzas
- Wall, G. (2006). Exergy. In C. Cleveland, and Morris, C, (Ed.). In *Dictionary of Energy*. Elsevier
- Wall, G. & Gong, M. (2001). On exergy and sustainable development-Part 1: Conditions and concepts. *Exergy, an International Journal*, 1(3), 128-145.
- Zumalacárregui De Cárdenas, L. M., Pérez Ones, O. & Rodríguez Ramos, P. A. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI, (3), 407-418  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.001>

# Anexos

## ANEXOS

**Anexo 1: 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 2: Entalpía específica de la ceniza de los combustibles sólidos; [kJ/kg].**

**Fuente: (Rodríguez, 2000)**

$\vartheta$ ; [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$(c\vartheta)_{cen}$	81	170	264	361	460	562	664	769	878	987
$\vartheta$ ; [°C]	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$(c\vartheta)_{cen}$	1100	1209	1365	1587	1764	1881	2070	2192	2337	2520

**Anexo 3: Condiciones de diseño de un generador de vapor VU-40. Fuente:(Vilches, 2022)**

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