



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO: Metodología para el análisis energético, exergético y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía.

Autor: Armando Pacios Puig

Tutores: MSc. Reinier Jiménez Borges

Dr.C Eduardo Julio López Bastida

CIENFUEGOS, 2018

DECLARATORIA DE AUTORIDAD



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

“Metodología para el análisis energético, exergético y emergético de la biomasa cañera como fuente de energía.”

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: Armando Pacios Puig.

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



*Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el bello y
maravilloso mundo del saber.*

Albert Einstein

Dedicataria



Dedicatoria

A mis padres, por apoyarme en cada momento y darme fuerzas para seguir adelante, por ser siempre mi guía y ayudarme a convertirme en la persona que soy hoy.

A mis abuelos por la formación, educación y preocupación constante por mis estudios.

A Eduardo por su apoyo incondicional, sus buenos consejos, y guía en cada momento.

Agradecimientos



Agradecimientos

*A mis tutores Reinier y Eduardo Julio, que me han apoyado siempre con sus ideas y sus conocimientos, por su dedicación y entrega incondicional para la realización de esta tesis,
gracias.*

A mis padres y mis abuelos, por el amor que siempre me han brindado, por todo el apoyo para que lograra esta meta, que sin ellos hubiera sido imposible, les digo que los quiero mucho.

A mi hermano y Eduardo, por estar siempre presente y ayudarme en todo y ser personas maravillosas, muchas gracias.

A mi novia por quererme tanto y estar siempre conmigo brindándome su ayuda y aconsejándome para obtener mejores resultados, te quiero mucho.

A mis compañeros de aula por compartir estos cinco años ayudándonos mutuamente y viviendo momentos inolvidables.

A todos los profesores que han contribuido con mi formación a lo largo de estos cinco años.

A todas las personas que de una forma u otra me han apoyado en el transcurso de estos cinco años de carrera y a los que contribuyeron con la realización de este trabajo.

A todos Mil Gracias...

Resumen



RESUMEN

En este estudio se analiza la utilización de las fuentes renovables de energía en particular la biomasa cañera con el propósito de evaluar la eficiencia en la utilización con propósitos energéticos. Para ello se presenta una metodología basada en costes físicos o energéticos que permite la evaluación desde un punto de vista energético, exergético y emergético. A partir del análisis energético y exergético se determinó que las mayores eficiencias tanto por el método directo como indirecto fueron para la combinación del Bagazo-RAC (80,72 %, 79,72 % respectivamente), así como la eficiencia exergética más alta (33,65 %), además del menor costo de producción de vapor (80,26 CUC/ton), para el caso del bagazo la eficiencia exergética es menor y el costo de producción de vapor mayor (18,22 %, 93,57 CUC/ton respectivamente). Finalmente, a través del balance emergético se analizó la sostenibilidad para estas biomásas a través de su contribución al impacto ambiental.

Palabras Claves: bagazo, Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), balance energético, balance exergético, balance emergético.

Summary



SUMMARY

In this study, the use of renewable energy sources, particularly sugarcane biomass, is analyzed with the purpose of evaluating the efficiency in the use for energy purposes. To do this, a methodology based on physical or energy costs is presented, which allows the evaluation from an energy, exergy and emergent point of view. From the energy and exergy analysis it was determined that the highest efficiencies, both by the direct and indirect method, were for the Bagasse-RAC combination (80,72 %, 79,72 % respectively), as well as the highest exergy efficiency (33, 65%), in addition to the lower cost of steam production (80,26 CUC / ton), in the case of bagasse the exergy efficiency is lower and the cost of steam production higher (18,22 %, 93,57 CUC / ton respectively). Finally, through the emergence balance, sustainability was analyzed for these biomass through its contribution to environmental impact.

Key words: bagasse, Agricultural Harvest Residues (RAC), energy balance, exergy balance, emergent balance.

Índice



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA CAÑERA COMO FUENTE DE ENERGÍA Y LA POSIBILIDAD DE EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD DE ESTOS PROCESOS MEDIANTE COSTES ENERGÉTICOS.....	6
I.1 Situación actual de las Fuentes Renovables de Energía (FRE).....	6
I.1.1 Disponibilidad de la biomasa como fuente de energía.....	8
I.1.2 Potencial de la biomasa como fuente de energía	11
I.1.3 Estimación de la biomasa con propósitos energéticos.....	14
I.2 Métodos de valoración de costes físicos o energéticos	19
I.2.1 Balance energético	20
I.2.2 Balance exergético.....	23
I.2.3 Balance emergético	25
CAPÍTULO II METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA A PARTIR DE BALANCES DE COSTES ENERGÉTICOS....	32
II.1 Metodología multicriterio para el análisis de la biomasa	32
II.1.1 Descripción de la biomasa	33
II.1.2 Selección de la tecnología	33
II.1.3 Balance de energía en el proceso de combustión	35
II.1.4 Balance de exergía en el proceso de la combustión.....	44
II.1.5 Balance de emergía en el proceso de combustión	49
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	58
III.1 Descripción de la biomasa	58
III.2 Descripción de la tecnología	59
III.3 Análisis energético	61
III.3.1 Determinación del poder calórico de los combustibles	61
III.3.2 Determinación de los volúmenes teóricos de los productos de la combustión completa y del aire para los combustibles	62
III.3.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles	63

III.3.4 Determinación del coeficiente exceso de aire a la salida del horno y de la caldera	63
III.3.5 Determinación de las entalpías específicas de los productos de la combustión y del aire	64
III.3.6 Determinación de las entalpías de los gases de salida y del aire frío	64
III.3.7 Determinación de las pérdidas mediante la combustión	65
III.3.8 Determinación de la eficiencia energética por el método directo e indirecto.	66
III.4 Análisis exergético	67
III.4.1 Determinación de las entalpías y entropías de las entradas y salidas.	67
III.4.2 Determinación de las exergías específicas	68
III.4.3 Determinación de las exergías de entrada y salida.....	68
III.4.4 Determinación de las pérdidas y eficiencia exergética.....	69
III.4.5 Datos preliminares para el cálculo exergoeconómico	70
III.4.6 Cálculo de los costos exergoeconómicos	70
III.5 Análisis emergético	71
III.5.1 Límites espacio temporales del estudio	71
III.5.2 Modelación del sistema.....	71
III.5.3 Resultados de la tabla emergética	74
III.5.4 Análisis de los indicadores	77
III.6 Análisis multicriterios de los resultados	79
CONCLUSIONES GENERALES	81
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS	92

Introducción



INTRODUCCIÓN

La política energética ha resultado ser un tema prioritario dentro del panorama estratégico mundial. La infraestructura energética de muchos países se basa en el consumo masivo de combustibles fósiles no renovables, cuyo agotamiento obliga a la búsqueda de alternativas energéticas viables económica y ambientalmente sustentables a fin de alcanzar una independencia energética a través de tecnologías limpias y bajas en consumo de carbón. La utilización de los combustibles fósiles ha provocado la degradación y alteración de diversos ecosistemas, debido a las emisiones contaminantes que son generadas durante el proceso de producción o utilización de energía. La independencia energética implica la planeación y evaluación de fuentes alternas de energía que permitan un desarrollo sustentable en todos los sectores de la economía, así como una mayor diversificación de la matriz energética que impulse las energías renovables y limpias en los procesos productivos.

La utilización de la biomasa para la generación de energía se ha incrementado en los tiempos actuales. 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.

La bioenergía es actualmente la mayor fuente de energía renovable en la Unión Europea, presentando un crecimiento de un 11% por año durante el período 2005-2012 (Giuntoli, 2016), cubriéndose el consumo de energía total primaria en un 8 % (Brosowski, 2016). En el 2013 el uso en Suecia de la biomasa alcanzó los 483 PJ, casi la mitad de ese consumo total fue utilizado en el sector de la energía para la generación de electricidad y calor (Ericsson, 2016). Durante el 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 (Sawin, 2016). 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).

Introducción

La tendencia de hoy en día a nivel internacional y en el país es la de llevar las fuentes renovables de energía a altos niveles de aprovechamiento y eficiencia, con el objetivo de generar una mayor cantidad de energía eléctrica. Dentro de estos recursos renovables se encuentra la biomasa que ha sido utilizada desde siempre por el ser humano, se define relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, como: La fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos (Pinedo, 2013).

La definición de biomasa tiene un carácter muy amplio, ya que dentro de ella se engloba una diversidad de fuentes energéticas que comparten determinadas características, pero que difieren entre sí en cuanto a las tecnologías para su obtención y aplicación para la producción energética (Cerdá, 2012).

Lewandowski (2006), realiza un levantamiento del potencial de biomasa a nivel regional, estimándose el potencial de energía para seis escenarios en estudio. Además en los estudios de (Ferreira, 2017; Hossen, 2017; Li, 2017; Ozcan, 2017; Ozturk, 2017; Suzuki, 2017; Thomas, 2017; Toklu, 2017; Vavrova, 2017) se basan para el análisis de la biomasa como fuente de energía en las estimaciones de cantidad para la posterior evaluación del potencial energético.

Estos estudios no presentan en la mayor parte de los casos un enfoque de manera integral. Las metodologías analizadas por su parte no evalúan el proceso desde la sostenibilidad y además no reflejan indicadores tradicionales. Por su parte no enfatizan en el análisis la perspectiva desde la economía ecológica como es el caso de LCA (Análisis de Ciclo de Vida) y Huella Ecológica.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista

medio ambiental. Cuba como país insular, constituye la primera prioridad en los lineamientos actuales de la política económica y social del país, de ahí que la energía sea un eje transversal en este propósito. Según Guerra (2016) 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%.

Tradicionalmente se han realizado análisis termoenergéticos de este recurso sin un enfoque integral de evaluación, debido a la no existencia de una metodología que permita evaluar desde la perspectiva energética, exergética y emergética la biomasa como fuente de energía y además evaluar la eficiencia y eficacia en la utilización de este recurso.

Problema científico

La no existencia de una metodología que permita evaluar el potencial de biomasa como fuente de energía a partir de una perspectiva de costes físicos o energéticos.

Hipótesis

Es posible evaluar mediante un análisis de costes energéticos la sostenibilidad en el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía.

Objetivo General

Evaluar el potencial de la biomasa como fuente de energía a partir de análisis energético, exergético y emergético.

Objetivos Específicos

1. Analizar el estado del arte de la biomasa cañera como fuente de energía y la aplicación de métodos de costes energéticos para evaluar la sostenibilidad.
2. Elaborar una metodología que permita evaluar la biomasa cañera como fuente renovable de energía a partir de balances de costes energéticos.
3. Validar la metodología con diferentes biomasa cañeras en una caldera de tipo RETAL.

La tesis se estructura en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos donde:

Capítulo 1: SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA CAÑERA COMO FUENTE DE ENERGÍA Y LA POSIBILIDAD DE EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD DE ESTOS PROCESOS MEDIANTE COSTES FÍSICOS.

En este capítulo se describe la utilización de las fuentes renovables de energía en particular la Biomasa tanto a nivel internacional como para el país. Se analizan las principales metodologías de análisis del potencial energético de la biomasa así como la eficiencia en la utilización con propósitos energéticos evaluada por métodos de balances energéticos, exergéticos y emergéticos. Finalmente se presentan los alcances y limitaciones para cada uno de estos métodos, necesarios para poder evaluar la integralidad y sostenibilidad en la utilización de este recurso como fuente de energía.

Capítulo 2: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA A PARTIR DE BALANCES DE COSTES ENERGÉTICOS.

En este capítulo se desarrolla una metodología que posibilita evaluar para las fuentes de biomasa a partir de balances de costes energéticos la cantidad, calidad y sostenibilidad a través de los balances energéticos, exergéticos y emergéticos. El balance energético para determinar la eficiencia térmica en la combustión de la biomasa y las pérdidas fundamentales que ocurren durante el proceso. El balance exergético para conocer cuanta energía útil es aprovechada y los costos asociados al proceso de combustión y finalmente el balance emergético para evaluar la sostenibilidad integral complemento de los criterios energéticos y exergéticos.

Capítulo 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se determina la eficiencia energética a partir de la combustión del bagazo y bagazo-RAC en un generador de vapor tipo RETAL presente en la Industria azucarera cubana y de la provincia. Es determinado además la energía útil y los costos exergoeconómicos mediante un balance exergético. Finalmente se evalúa la sostenibilidad integral a partir de un análisis emergético para el sistema de generación de vapor.

Capítulo 1



CAPITULO I SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIOMASA CAÑERA COMO FUENTE DE ENERGÍA Y LA POSIBILIDAD DE EVALUAR LA SOSTENIBILIDAD DE ESTOS PROCESOS MEDIANTE COSTES ENERGÉTICOS

En este apéndice se realiza un análisis acerca de la situación de la biomasa tanto a nivel internacional como nacional, profundizándose en la política actual que tienen las fuentes renovables, fundamentalmente la biomasa y la aplicación de estas con fines energéticos. Además, se realiza una revisión bibliográfica acerca de los costes energéticos mediante los balances energético, exergético y emergético; valorándose los principales alcances y las limitaciones que presentan.

I.1 Situación actual de las Fuentes Renovables de Energía (FRE)

Actualmente se vive en una sociedad cuyo desarrollo viene de la mano de un consumo voraz, en donde se exigen unos estandartes de calidad y confort cada vez mayores, debido a la gran demanda energética que ha pasado de 16 830 TWh/año en 2005 a 21 776 TWh/año en 2014 (van Hal, 2017), esta ha de ser suplida a través de las fuentes actuales de producción de energía, y con el ritmo actual de crecimiento, su sostenibilidad es discutible.

Históricamente, la mayor parte de esta producción de energía ha provenido de fuentes de energía no renovables, como son los combustibles fósiles, entre ellos el carbono, el petróleo y el gas natural. Además, desde los 50, la energía nuclear ha sido un pilar básico en este ámbito. Sin embargo, todos estos procesos de obtención de energía eléctrica conllevan diversos inconvenientes, los combustibles fósiles tienen fecha de caducidad, sus reservas para la extracción de los medios naturales tienen límite y el impacto ecológico en el planeta es un hecho. El incremento de la contaminación, efecto invernadero, lluvias ácidas, la desertización, son algunos de sus efectos adversos. Luego, los peligros que extraña la energía nuclear son palpables aún en el ecosistema. Por ello, debido a su uso limitado y a su impacto ambiental, nuevas formas de generación de energía se han desarrollado e implantado en los últimos años, las energías renovables.

Estas energías renovables presentan características que mitigan tanto el impacto ambiental en el planeta, como las limitaciones de abastecimiento. Entre ellas podemos encontrar la eólica, solar (fotovoltaica y térmica), hidráulica o hidroeléctrica, biomasa y biogás, geotérmica y mareomotriz. Estas energías presentan multitud de ventajas frente a las anteriormente nombradas, su uso se muestra imprescindible de cara a una lucha contra el cambio climático, son una solución limpia y viable frente al impacto ecológico. Son inagotables, al contrario de los combustibles de base de carbono estas energías presentan disponibilidad ilimitada y disminuyen la dependencia energética, al presentar un carácter más local de uso, disminuyen la dependencia a la importación de combustibles fósiles y reducen su coste de transporte. Son crecientemente competitivas, su coste por kWh cada vez se acerca más al aquel extraído por combustibles fósiles o energía nuclear, incluso en ciertos casos es más económico. Por último, presentan un horizonte político favorable, la comunidad internacional entiende la obligación de reducir la degradación medioambiental del planeta a través de una transición hacia energías renovables y esto reflejado en un marco político que impulsa las fuentes energéticas limpias (van Hal, 2017).

Los últimos años han sido notables para la energía renovable, pues representan las mayores incorporaciones en la capacidad mundial vistas hasta la fecha. La participación de las energías renovables es de un 19,2 % a pesar de que el 78,3% lo tienen los combustibles fósiles (Figura I.1). Sin embargo, los desafíos persisten, sobre todo más allá del sector eléctrico. Se han observado diversos avances que influyeron en el incremento en la energía renovable, incluyendo una disminución en los usos de los combustibles fósiles a nivel mundial y un aumento significativo de los sistemas de acumulación de energía (Sawin, 2016).

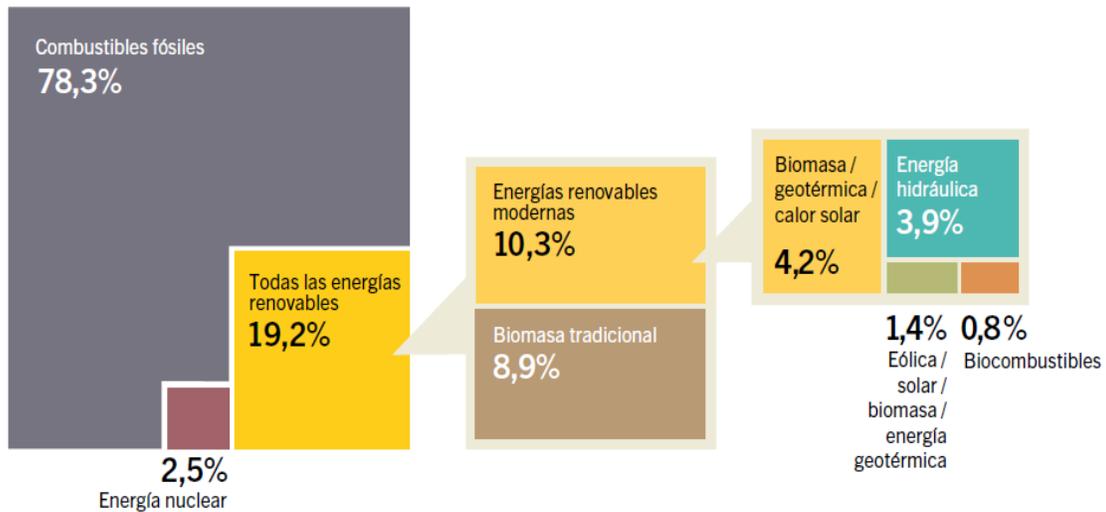


Figura I.1 Cuota de energía renovable en el consumo final de energía, 2014. Fuente: Sawin, 2016.

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de política aplicada; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética y cuestiones de medio ambiente y emergente, así como la necesidad de acceso a una energía modernizada.

Según (Sawin, 2016) durante el 2015, se añadió un estimado de 147 GW de capacidad de energía renovable, el mayor incremento anual jamás registrado; la capacidad calorífica renovable aumentó en alrededor de 38 GWt; y la producción total de biocombustibles continuó al alza. Este crecimiento se produjo a pesar del desplome de los precios globales de los combustibles fósiles, además de otros retos respecto a las energías renovables, incluyendo la integración de los avances en la participación de la generación de energía renovable, barreras normativas y restricciones fiscales.

I.1.1 Disponibilidad de la biomasa como fuente de energía

Entre las diversas fuentes de energías renovables se encuentra la biomasa que comprende tanto los productos de origen vegetal como los de origen animal como se muestra en la figura I.2.

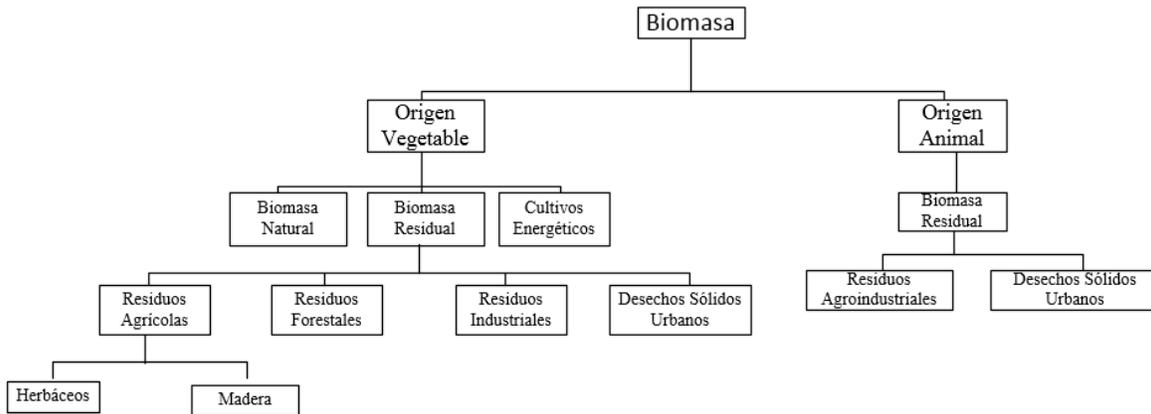


Figura 1.2 Clasificación de la biomasa de acuerdo a su origen. Fuente: Jiménez, 2017.

En cuanto a los usos de la energía producida con biomasa, éstos pueden ser para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico (viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos, barrios o municipios enteros), calor para procesos industriales y generación de electricidad. En resumen, todo el conjunto de fuentes energéticas que comprende la biomasa puede tener tanto aplicaciones térmicas como eléctricas.

Según Cerdá (2012) la producción térmica sigue una escala de usos que comenzaría con las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares, en un segundo escalón se sitúan las calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, equiparables en su funcionamiento a las calderas habituales de gasóleo o gas natural, que proveen a las viviendas de calefacción y agua caliente y en un tercer escalón aparecen las redes de calefacción centralizada (district heating). La red de calor y agua caliente llega no sólo a viviendas y urbanizaciones sino también a edificios públicos, centros deportivos, complejos comerciales e incluso industrias. Estas centrales térmicas requieren instalaciones exclusivas, debido al mayor tamaño tanto de las calderas como de los silos de almacenamiento.

Asimismo, en algunos casos también pueden cubrirse las necesidades térmicas de ciertas industrias con calderas de biomasa. Las industrias agroforestales normalmente aprovechan sus residuos para la producción de calor y, en ocasiones, se acompaña de

producción eléctrica (cogeneración con biomasa). La producción de electricidad a partir de biomasa sólida precisa de sistemas complejos, dado el bajo poder calórico de esta fuente energética, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido de volátiles. No obstante, la aplicación eléctrica de la biomasa sólida contribuye a la estabilidad de la red de distribución, dada su capacidad para proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día, independientemente de las diferentes condiciones meteorológicas (sol, viento o lluvia). Se trata, por tanto, de una energía renovable con un carácter gestionable lo que la distingue de otras fuentes renovables.

Según Ríos (2016) en los últimos tiempos ha surgido un renovado interés, motivado principalmente por el ánimo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, e impulsar procesos de independencia energética de los hidrocarburos, que aprovechen recursos renovables locales. Las principales dificultades que encuentra la biomasa para su mayor aprovechamiento tienen que ver con la baja densidad energética, el alto volumen ocupado, su complejo manejo, almacenamiento y transporte; en este sentido se motiva la conversión de la biomasa en combustibles líquidos y gaseosos cuya densidad energética es mayor y son más fácilmente manejados, almacenados y transportados. En cuanto a los beneficios de la utilización energética de la biomasa se pueden mencionar:

- Renovabilidad: Siempre que exista un manejo adecuado de los recursos involucrados, se puede afirmar que la biomasa es fuente renovable de energía.
- Beneficios ambientales: No obstante, la combustión de la biomasa o sus derivados libera dióxido de carbono al ambiente, se considera que éste ha sido a su vez capturado por las plantas durante su vida, por lo cual se habla de la biomasa como un combustible carbono neutral; inclusive, la biomasa emite menor cantidad de CO₂ por unidad de energía liberada comparativamente con los combustibles fósiles. En relación con eventuales requerimientos de captura y secuestro de carbono, un sistema que utiliza gasificación de biomasa presenta notables ventajas en relación con sistemas que utilizan la combustión directa de combustibles fósiles, dada la mayor densidad de CO₂ en los efluentes de

combustión del gas de síntesis producto de la gasificación. En general la biomasa contiene cantidades menores o incluso insignificantes de azufre en relación con los combustibles fósiles. El material particulado presente en el gas de síntesis es inferior en varios órdenes de magnitud en relación con la emisión por combustión de hidrocarburos.

- Beneficios sociopolíticos: Al ser un recurso local (no hay otra manera de que el uso de biomasa sea económicamente viable), se genera un impacto positivo en la economía regional llegando inclusive a representar varias veces la generación de empleo con relación a una planta con base en combustibles fósiles. También el fomento de la independencia energética en relación con los precios fluctuantes y volátiles de los combustibles fósiles se considera un impacto positivo.

I.1.2 Potencial de la biomasa como fuente de energía

La biomasa ha tenido una importante participación en el consumo total de energía y en el consumo final de energía por sectores en el mundo, tal como se muestra en la figura I.3.

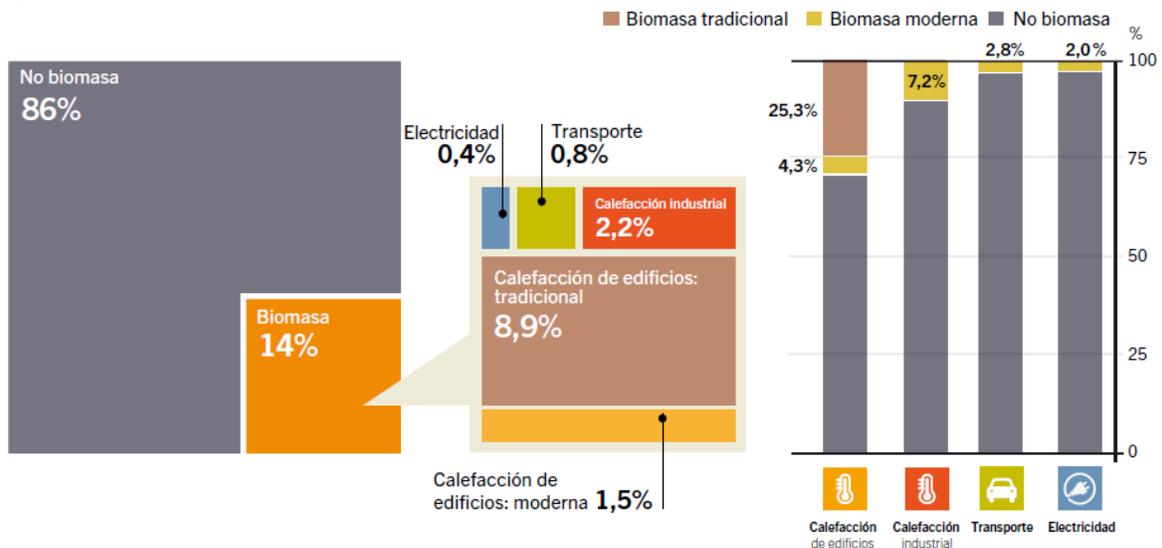


Figura I.3 Participación de la biomasa en el consumo total final de energía y en el consumo final de energía por sector de uso final, 2014. Fuente: Sawin, 2016.

Capítulo 1

Las fuentes de energías renovables son suficientemente abundantes para proveer el potencial para las necesidades de energía a nivel mundial para el próximo siglo. Desechos de bosques, agricultura y otros desechos orgánicos serán suficientes para proveer entre 50-150 EJ/año.

En Cuba según ("Aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la agricultura cubana," 2018) el potencial de la biomasa es muy amplio, debido a que se cuenta con 26 000 t de residuos de las industrias de arroz y la poda de las plantaciones de cítricos, 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/m³, con un crecimiento de hasta 7m de altura y alta dureza y solidez, con un período de servicio de 50 años. Además, el marabú es un excelente combustible debido a su bajo contenido de humedad (22% de humedad de almacenaje, en el extremo inferior del rango para una astilla secada al aire) y se estima que tengan un rendimiento promedio de 70-90 t/h. Por lo tanto, se ha estimulado al desarrollo de este recurso con la implementación de las 10 primeras cosechadoras después de completar con éxito los ensayos preliminares y la logística de marabú ahora se establece como una unidad de negocio separada y cumple con los pedidos de biomasa del país mientras se perfeccionan las técnicas de cosecha.

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

Para poder explotar los recursos de la biomasa es necesario según "Aplicaciones de las fuentes renovables de energía en la agricultura cubana" (2018):

- Lograr una penetración en la matriz energética del MINAG superior al 25 %.
- Propiciar la sostenibilidad de los procesos de las cadenas de producción agropecuarias.

- Disponer de fuentes de financiamiento a mediano y largo plazo que permitan efectuar los pagos con el rendimiento de la inversión.
- Independencia energética de nuestras cadenas productivas ante las afectaciones que pueda tener el sistema electro energético nacional.
- Aprovechamiento energético de los sistemas de tratamiento de residuales en los procesos productivos agroindustriales.
- Mitigación del impacto ambiental logrando productos sanos.
- El desarrollo rural, por la creación de empleos, la capacitación de los productores y un impacto directo en la mejora de sus condiciones de vida.

Debido a esto Cuba se encuentra inmersa en un programa con vistas al desarrollo de las fuentes renovables de energía y de la eficiencia energética. La biomasa cañera cuenta con una capacidad instalada de 470 MW en 57 centrales azucareros, 0,82 MW instalados en 5 plantas de biogás así como 0,50 MW para el aprovechamiento en 4 plantas de biomasa no cañera, por lo que sobre esta fuente se encuentra enmarcada la utilización actual de las FRE. En el 2014 se aprobó una política con perspectivas al desarrollo de las FRE, donde se prevé la instalación de 19 bioeléctricas con una capacidad de 755 MW, la provincia de Cienfuegos tendría una participación con la bioeléctrica "5 de Septiembre" para una capacidad a instalar de 60 MW mediante una inversión extranjera, así como aprovechar otras potencialidades como la biomasa forestal, Desechos Sólidos Urbanos y los Residuos Orgánicos Industriales y de la Agricultura. (Hernández, 2018)

En la figura I.4 se muestra según Hernández (2018) como se encuentra la situación de las energías renovables en el presente y como se esperan para el 2030 logrando un incremento de la eficiencia energética que es una necesidad y además una oportunidad de inversión fundamentalmente en la industria azucarera.

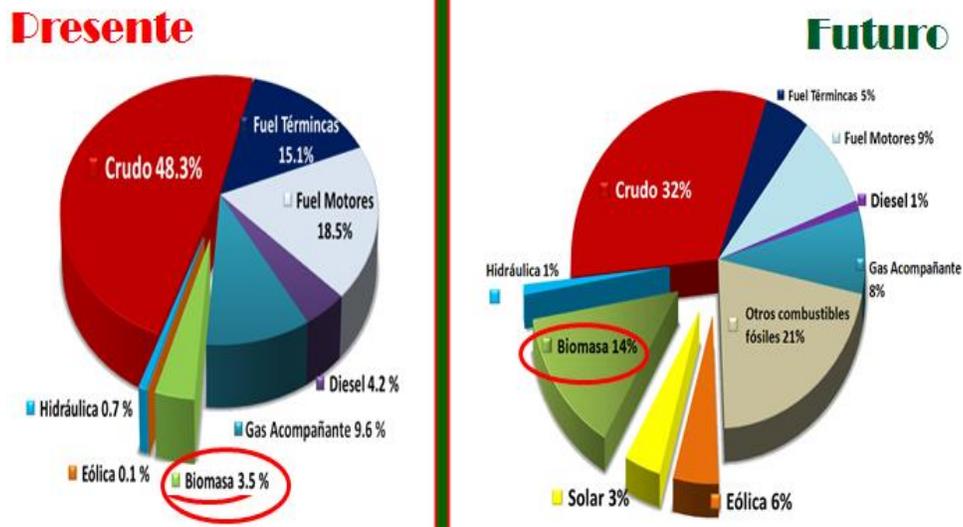


Figura I.4 La generación con fuentes renovables de energía es una prioridad para Cuba.

Fuente: Hernández, 2018.

I.1.3 Estimación de la biomasa con propósitos energéticos

La literatura cuenta con numerosos estudios relacionados con la estimación de la biomasa y su utilización con fines energéticos. Li (2017), en el estudio "Biomasa urbana y métodos para la estimación de las fuentes de biomasa municipales", considera el potencial de las biomasa para ser aplicado como fuente de energía a nivel municipal. Los métodos de estimación en este trabajo fueron clasificados como:

1. Método de medición
2. Método semi-empírico,
3. Método de modelación avanzada.

Los dos métodos de modelación avanzada utilizados para estimar las fuentes de biomasa municipales fueron, el método de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y el método de regresión lineal múltiple. El método de RNA se presenta como tendencia para estimar las cantidades de biomasa disponibles. Por otro lado el análisis de regresión lineal múltiple es una de las maneras clásicas de estimar la cantidad de biomasa.

Vavrova (2017), presenta la metodología y estudio de casos para las condiciones de la República Checa empleando el modelo BICOM (Blomass COmpetiveness Model). El modelo consiste en los siguientes módulos: a) la identificación del potencial de biomasa en un área utilizando la modelación por GIS (basados en condiciones climáticas y de suelo), b) modelación del precio de la biomasa (usando la metodología del precio mínimo desde el punto de vista de los productores y evaluando los costos oportunos de la producción agrícola convencional), c) modelando el procesamiento de la biomasa y la logística, d) modelando la competitividad económica de la utilización de la biomasa y el carbón.

Toklu (2017), determina el potencial de energía total de biomasa en Turquía en alrededor de 33 Mtoe, donde el potencial de biomasa utilizable es de 17 Mtoe. El potencial de producción eléctrica de las fuentes de bioenergías utilizables es de 73 MW en el 2010 representando algo más de 280 000 empleos. Ferreira (2017), propone el alcance, potencial y tecnologías relacionadas con el uso de las fuentes de biomasa. Además, el estudio discute los proyectos gubernamentales y no-gubernamentales relacionados con la biomasa, planes y estrategias para promover estas. La situación actual de los recursos biomásicos muestra que el potencial total estimado para varios sectores de Portugal es de 42 489,7 GWh/año. Thomas (2017), examina el potencial, objetivos y oportunidades de las biomásas en la economía india. Además de analizar las técnicas de conversión propia para cada una de estas fuentes, así como la factibilidad de conversión.

Ozcan (2017), determina la cantidad de energía eléctrica primaria obtenido del potencial de biomasa de acuerdo a diferentes tipos de fuentes de biomásas. Las fuentes evaluadas fueron los residuos sólidos municipales, cultivos energéticos, residuos de animales, etc. Como resultados de los métodos de cálculo, el valor total de energía primaria del biogás obtenido de las fuentes de biomásas examinadas es 188,21 TWh/año, así como el total de energía primaria relacionado con el potencial de las fuentes de biomásas evaluadas fue de 278,40 TWh/año.

Ozturk (2017), refleja que la producción anual de desechos en Turquía es de 30 Mton. Turquía además produce 1,5 Mton de biodiesel, 3 Mton de bioetanol, y de 2.5-4.0 billones de m³ de biogás al año. Hossen (2017), presenta una valoración objetiva de la biomasa disponible como una fuente prominente de energía y sugiere este potencial como una fuente de energía primaria sostenible que eventualmente puede reemplazar la utilización de combustibles fósiles a largo plazo. El contenido energético de la biomasa puede ser determinado mediante experimentación directa o también puede ser calculado a partir de un análisis de proximidad. Este último incluye la fracción en peso de (Humedad, Contenido de volátiles). A partir de estos datos el valor calórico puede ser determinado usando ecuaciones empíricas. Se estimó que el total de biomasa disponible procedente de la agricultura, desechos, industrias, animales y otras fuentes pueden generar más de 3 447 PJ (> 950 TWh) de energía.

Suzuki (2017), analiza el potencial de energía de biomasa en Sabah a partir de datos establecidos de la literatura, datos estadísticos y documentos disponibles. El trabajo presenta que el potencial energético de la biomasa es alrededor de 267,18 GJ/año en total. Vavrova (2017), evalúa el potencial de las biomásas para un área definida basado en una metodología desarrollada usando detalles espaciales y datos empíricos, en el mismo se demuestra como este potencial depende de la región, así como de la composición de esta biomasa. Stich (2017), evalúa el potencial de generación de energía eléctrica a partir de residuos de la agricultura, ganadería y estima el costo de la producción de electricidad a partir de estos. Un modelo de optimización de costo fue desarrollado para evaluar el costo-beneficio a partir de producir electricidad de estas fuentes usando varias tecnologías de conversión. Ozoegwua (2017), a partir de datos estadísticos del total de residuos de agricultura en Nigeria emplea técnicas de regresión estableciendo factores de escala para el procesamiento de esos datos. El potencial total estimado de biomasa forestal en Indonesia en el 2013 fue de 132 PJ, alrededor del 50,4 % en residuos de la cosecha y el 49,6% de los residuos del procesamiento de la madera. Simangunsong (2017), estima el valor económico del potencial de biomasa forestal una vez transformada en Pellets en US 5,6 \$/ton de residuos de madera. Gonzalez-Salazar (2016), presenta un nuevo enfoque para la estimación del potencial

de energía de la biomasa particularmente cuando la disponibilidad de datos es limitada. Esta metodología mejora la confiabilidad de la predicción. La aplicación de estas para el escenario energético en Colombia reflejó que la estimación teórica del potencial energético es casi idéntico comparado con el estimado preliminarmente debido al nivel de incertidumbre relativamente bajo. La metodología propuesta para reducir la incertidumbre en la evaluación de la energía de las biomásas presenta cuatro pasos descritos en la figura I.5.

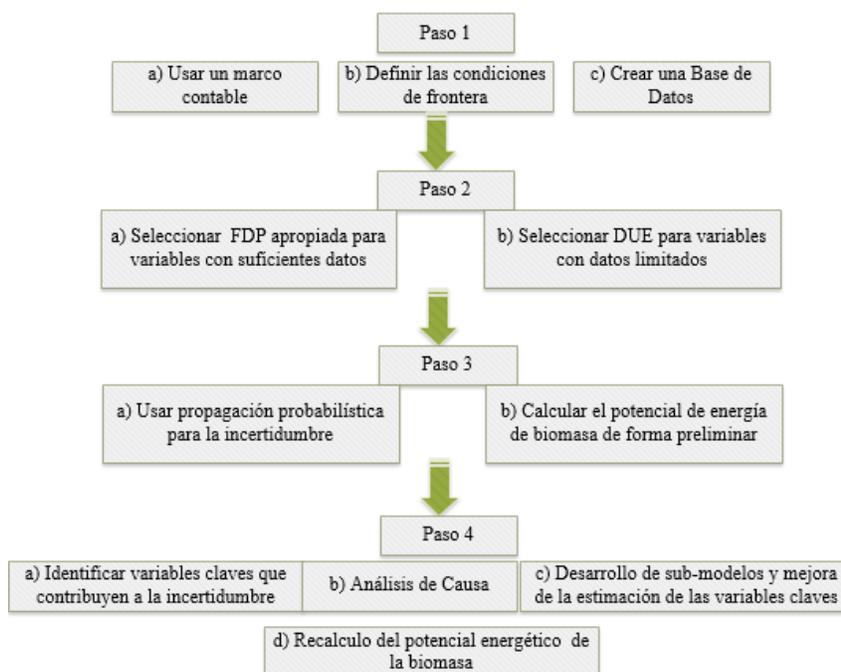


Figura I.5: Metodología para reducir la incertidumbre en la evaluación de la biomasa. Fuente: Gonzalez-Salazar, 2016. **(FDP: Función de Densidad Probabilística. DUE: Distribución Uniforme Extendida)**

Loh (2016), caracteriza las numerosas maneras de como la biomasa a partir del aceite de palma en Malasia puede ser utilizado como combustible, así como evalúa los datos recolectados en función del potencial energético, las tecnologías de conversión relacionada con este tipo de biomasa y posibles problemas relacionados con la combustión, una vez que la industria de aceite de palma en este país es una de las más

grandes contribuidoras de biomasa lignocelulósica con más del 90% del total de biomasa en el país derivadas de 5,4 millones de hectáreas.

El calentamiento de distritos satisface alrededor del 60% de la demanda de calor en los edificios suecos, más de 2/3 del suministro de calor para estos sistemas es basado en biomasa y desechos. Ericsson (2016), presenta las experiencias de la introducción y expansión del uso de la biomasa en los sistemas de calentamientos de distritos, así como las vías de intensificación. Giuntoli (2016) utiliza la evaluación del Análisis del Ciclo de Vida Atribucional (A-LCA en inglés) para analizar el potencial de mitigación del cambio climático de tres plantas que utilizan biomasa residual comparado con otras que utilizan combustibles fósiles en la Unión Europea. Phillips (2016) realiza un estudio concerniente a la viabilidad que cuenta la biomasa como combustible en el Reino Unido, estimándose un total de 500 kt/año. Figueroa (2016), estima la cantidad de energía eléctrica que puede producirse a partir de la paja de trigo en la región Araucana de Chile. En el estudio se estimó que el total de biomasa disponible fue de 0,622 millones de toneladas, siendo el distrito de Quisque el de mayor producción con 0,27 millones de toneladas. El potencial técnico para la generación en una planta de 5MWt de capacidad de generación es de 3,17 MWe con tecnología de cogeneración utilizando combustión el lecho fluidizado y 4,89 MWe con turbina, y gasificadores de lecho fluidizado y gas - vapor combinados. Nakomcic-Smaragdakis (2016), estima el potencial de biomasa sólida (Residuos de Cosecha) de la provincia autónoma de Voivodina al norte de la República de Serbia. El potencial fue estimado inicialmente en 6,45 Mton/año, luego de considerar todos los factores que influyen fue concluido que solo 2,45 Mton/año, el 37,98% puede ser utilizado con fines energéticos. El sector de la biomasa desempeña un rol estratégico en las directivas de energías renovables acorde con los planes de acción de energía renovable nacionales elaborados en conjunto con la directiva 2009/28/EC.

Saif (2017), presenta un modelo de optimización discreta para la interacción entre el Clima, Tierra, Energía y Agua (CLEW en inglés). Este modelo examina la integración temporal y espacial entre los elementos de integración del CLEW. Se consideran

algunos aspectos de los sistemas CLEW en el estudio de los efectos en las emisiones de gases de efecto invernadero, así como la incorporación de biocombustibles en la generación de energía. Recientemente estos se encuentran direccionados en la simulación basados en la optimización utilizando softwares comerciales (MARKAL, MESSAGE, LEAP, WEAP), centrándose en regiones donde es fundamental optimizar estos recursos.

I.2 Métodos de valoración de costes físicos o energéticos

En la actualidad están tomando auge en el mundo toda una serie de metodologías basadas en la economía ecológica para valorar el potencial de los recursos naturales y la sostenibilidad de sus procesos como se muestra en la figura I.6.



Figura I.6. Metodología de análisis multicriterio basada en la economía ecológica. Fuente (Taller Internacional Canadá-Cuba. Matanzas 2018)

Uno de los métodos más extendidos es el basado en costes energéticos, los cuales utilizan una combinación de balances termodinámicos. Entre los balances más

utilizados se encuentran los balances de energía, exergía y emergía que permiten evaluar tanto eficiencia energética como exergética, además de una serie de costos exergoeconómicos. En cambio el balance emergético permite conocer calidad de energía, así como el impacto ecológico y medioambiental del sistema.

I.2.1 Balance energético

La energía es una propiedad que asociamos al estado de un sistema o de una partícula, que nos resulta adecuada para analizar los cambios a los que pueda estar sometido y que tiene una peculiaridad de que el valor numérico que podemos atribuirle a un sistema aislado o a una partícula no se modifica a pesar de los múltiples cambios que experimente. Científicamente este proceso se determinó como la primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía definida que se resume en: para un sistema abierto con flujo estable, la cantidad neta de energía añadida al sistema como calor y cualquier forma de trabajo es igual a la energía almacenada de la materia que sale del sistema menos la energía almacenada de la materia que entra al sistema, (Pintó, 1991). Esta Ley se utiliza para realizar los balances de energía en procesos térmicos

Debido a las grandes magnitudes de cantidad de energía consumida por los sistemas, estas suelen ser utilizadas en unidades como los kilowatt-hora (kWh) y las calorías (cal) ya que en el Sistema Internacional de Unidades (SIU) el joule (J) es la unidad estándar de energía, equivalente a $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$, pero al ser pequeño su valor donde: $1 \text{ kWh}=3,6\cdot 10^6 \text{ J}$ y $1 \text{ cal}=4,186 \text{ J}$, disminuye su aplicación por los grandes valores que suelen generarse.

Un balance de energía es una herramienta que facilita la planificación global energética, pero considerado junto con otros elementos del sistema económico. Es decir, tomado aisladamente el balance da una imagen de las relaciones físicas del sistema energético en un determinado período. Visualiza como se produce la energía, se exporta o importa, se transforma y se consume por sectores económicos y permite calcular ciertas relaciones de eficiencia y hacer un diagnóstico de la situación energética de un país,

Capítulo 1

región o proceso dado (SIEN, 2004). Los objetivos fundamentales del balance energético son los siguientes:

- Evaluar la dinámica del sistema energético en concordancia con la economía de cada país, determinando las principales relaciones económico-energéticas entre los diferentes sectores de la economía nacional.
- Servir de instrumento para la planificación energética.
- Conocer detalladamente la estructura del sector energético.
- Determinar para cada fuente de energía los usos competitivos y no competitivos que permitan impulsar cuando sea posible los procesos de sustitución.
- Crear las bases apropiadas que conlleven al mejoramiento y sistematización de la información energética.
- Ser utilizado para permitir la proyección energética y sus perspectivas a corto mediano y largo plazo.

Según Arrollo (2016) el balance energético de un sistema hace referencia a la primera ley de la termodinámica donde determina que la energía se transforma, no se puede destruir ni crear durante un proceso. Esta puede expresarse:

$$Q = \Delta E + W \quad \text{Ec 1.1}$$

Donde,

Q: Calor generado por el dispositivo.

ΔE : Energía del sistema.

W: Trabajo realizado.

Para obtener el balance térmico-energético de una caldera o generador de vapor, por ejemplo, hay que considerar dos aspectos: la energía proveniente del combustible y las pérdidas generadas durante la oxidación o combustión del mismo.

Los generadores de vapor se consideran sistemas estacionarios puesto que sus energías potencial y cinética son despreciables, por consiguiente, la energía total de un sistema es igual al cambio de su energía interna.

Capítulo 1

$$Q - W = \Delta U \quad \text{Ec 1.2}$$

Estos equipos a volumen constante, no generan trabajo. Por tanto:

$$Q = \Delta U \quad \text{Ec 1.3}$$

$$Q = \dot{m} * Q_i^t \quad \text{Ec 1.4}$$

Donde,

\dot{m} : Flujo de combustible equivalente de biomasa.

Q_i^t : Poder calorífico inferior.

El balance energético para un generador de vapor (Figura I.7) se realiza a partir de la ecuación 1.5.

$$Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} = \sum Q_{\text{pérdidas}} \quad \text{Ec 1.5}$$



Figura I.7 Balance de energía en una caldera. Fuente: Arrollo 2016.

Donde,

Q_{entrada} : Cantidad de calor entrante de combustible.

Q_{salida} : Cantidad de calor de salida.

$Q_{\text{pérdidas}}$: Cantidad de calor total perdido.

Cabe recalcar que, cuantas menos pérdidas se obtenga la combustión será más completa y por consiguiente el rendimiento aumentará, de ahí la importancia del estudio de eficiencia energética de los dispositivos termodinámicos.

I.2.2 Balance exergético

La exergía es una propiedad de los sistemas termodinámicos que incluye el entorno; se puede considerar como una medida de la “calidad” de la energía disponible y surge del análisis de un proceso con base en las dos primeras leyes de la Termodinámica (Mora, 2015). Es la máxima cantidad de trabajo que un sistema puede realizar mientras evoluciona de un estado determinado hacia un estado de equilibrio con el entorno. Es importante resaltar dos aspectos de esta definición: primero, la cantidad de trabajo dependerá del estado del entorno, de modo que la exergía no es unívoca con relación al estado del sistema en estudio; segundo, el equilibrio es general, es decir se refiere al equilibrio térmico, mecánico, químico, etc. Así, la exergía se puede entender como la medida del desequilibrio existente entre un sistema y su entorno (Ríos, 2016).

El balance de exergía permite evaluar la cantidad y la calidad de la energía, donde se debe entender como calidad de la energía a la cantidad de ésta que puede ser convertida en trabajo con el fin de aumentar la eficiencia de un proceso y disminuir la exergía desechada al ambiente, ya que tiene la capacidad de generar cambios no deseados en los ecosistemas (Contaminación térmica, por composición química, por vibraciones, etc.) (Dincer, 2007). Además, permite evaluar indicadores exergo-económicos como el costo exergético que no es más que la cantidad de exergía necesaria para la obtención de un producto, este indicador incluye la exergía del producto más la exergía necesaria para la obtención de ese producto. Es una herramienta de análisis que arroja información fina sobre optimización y generalmente se emplea en procesos industriales.

El balance de exergía es la aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica donde se combinan los balances de energía y entropía para cuantificar la energía disponible en el proceso.

Un sistema en un estado dado puede alcanzar nuevos estados mediante interacciones de calor y trabajo con su entorno. Como el valor de la exergía asociado con el estado final será por lo general diferente del valor correspondiente al estado inicial, puede inferirse que las transferencias de exergía a través de la frontera del sistema

acompañan a las interacciones energéticas de calor y trabajo. La variación de exergía en un sistema durante un proceso no será igual a la exergía neta transferida, ya que la exergía puede ser destruida a causa de las irreversibilidades presentes en el interior del sistema durante el proceso.

Cuando el sistema logra el equilibrio térmico, mecánico y químico con el entorno ha llegado al “estado muerto”, en el cual no existe desbalance alguno con dicho entorno y por lo tanto no es posible realizar ningún trabajo adicional. Es útil definir entonces un “estado muerto de referencia” que permita realizar comparaciones entre análisis de diferentes sistemas; la caracterización de un estado tal es una tarea compleja en cuanto dicho estado debe contener todos los elementos en sus compuestos químicos más estables y en proporciones relativas similares a las encontradas en la Tierra (Ríos, 2016). La ecuación 1.6 presenta de manera general un balance de exergía definido como:

$$\text{Exentrada} + \text{Exsalida} + \text{Exconsumida} = \text{Exacumulada} \quad \text{Ec 1.6}$$

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

$$\Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(S_2 - S_1) + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad \text{Ec 1.7}$$

Dónde,

$\Psi_2 - \Psi_1$: Aumento de exergía.

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

$(S_2 - S_1)$: Diferencia entropía.

T_0 : Temperatura ambiente.

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

$$\Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad \text{Ec 1.8}$$

I.2.3 Balance energético

La Emergía es la suma de toda la energía de una forma necesaria para desarrollar un flujo de energía de otra forma, en un período de tiempo dado. Esta herramienta es utilizada para comparar la obra de la naturaleza con la de los humanos (Izursa, 2011). La primera formalización de esta idea se llevó a cabo a partir del trabajo de Odum (1973), donde señalaba que “La energía se mide en calorías, BTUs, kilovatios-hora y otras unidades indiscutibles, pero existe una escala de calidad de la energía que no está contenida en estas medidas. La capacidad para desarrollar trabajo para el hombre, depende tanto de la cantidad como de la calidad de la energía, y se mide mediante la cantidad de energía de un grado de calidad bajo que es necesaria para generar otra de un grado mayor”.

Esto implica que 1 joule de energía solar, 1 joule de carbón o 1 joule de electricidad, aunque representan la misma *cantidad* de energía (1 joule), no representan la misma *calidad*, en el sentido del potencial que tienen estos distintos tipos de fuentes energéticas para actuar sobre el conjunto del sistema, es decir, en la necesidad que el sistema tiene de recibir mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas. La conclusión obvia es que existe una jerarquía de energías según su calidad o potencial para influir en el sistema, que va desde fuentes de energía poco concentradas (como el sol) hasta aquellas muy concentradas (como el petróleo) (Brown, 2004). Entonces se pueden comparar diferentes tipos de energía utilizando factores de conversión que muestran la cantidad de tipos de energía equivalentes. Al conectar diferentes tipos de energía se puede asociar varias partes y visualizar la complejidad de una manera sencilla, utilizando diagramas, a partir de los cuales se hacen cálculos de flujos y depósitos (Odum, 1996).

Capítulo 1

Entonces emergía es una medida de los procesos globales requeridos para producir algo expresados en unidades del mismo tipo de energía. Mientras más trabajo se haga para producir algo, más energía es transformada y más alto valor de emergía de lo que es producido (Odum, 1996).

Gran parte del concepto de emergía es el concepto de transformidad, la cual se define como la emergía de un tipo requerida para hacer una unidad de energía de otro tipo (Odum, 1996). Para poder transformar las diferentes calidades de energía a la calidad de energía solar correspondiente, se usa el factor de equivalencia transformidad, que informan qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesaria para generar una unidad de energía de mayor calidad. Por tanto, la transformidad tiene unidades de seJ/unidad de energía (Lomas, 2009). Por ejemplo, si se requieren 10 000 emjulios solares para generar un julio de madera, entonces la transformidad solar de la madera será de 10 000 emjulios solares por julio (seJ/J, en su forma abreviada). La transformidad de la luz solar absorbida por la Tierra es 1.0 por definición.

La selección de la energía solar como la energía de referencia, es debido a que es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecósfera (en la tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero debido a que fluye en el tiempo y espacio, tiene una baja calidad en comparación a otras formas de energía de la tierra derivadas desde ésta) (Cano, 2012).

La emergía específica se expresa en emergía por unidad de masa generada, habitualmente como emergía solar por gramo (seJ/g). Los recursos materiales se evalúan mejor con datos sobre una base de emergía por unidad de masa, dado que se requiere energía para concentrar los materiales y el valor emergético unitario de cualquier sustancia se incrementa con la concentración. Los elementos y compuestos no abundantes en la naturaleza tienen entonces mayores relaciones emergía/masa cuando se encuentran más concentrados dado que se requiere más trabajo ambiental para concentrarlos, tanto espacialmente como desde un punto de vista químico.

El balance emergético permite con base científica contabilizar el valor ambiental y el valor económico, haciendo uso de la Economía, Teoría de Sistemas, Termodinámica,

Biología y los nuevos principios del funcionamiento de sistemas abiertos. Este abordaje posibilita visualizar y cuantificar de forma dinámica los flujos de los recursos naturales, de los servicios ambientales provenientes de la naturaleza y de los impactos de las actividades, permitiendo la comprensión de los límites en cada ecosistema o sistema productivo y el establecimiento de metas para garantizar la capacidad de soporte, es decir, determina la sustentabilidad de los sistemas (Aguilar, 2015). Este procedimiento está diseñado para evaluar los flujos de energía y materiales de los sistemas en unidades comunes (sej) que permitan al analista comparar aspectos ambientales y financieros de los sistemas (Odum, 1996). Permite la comparación e incorporación de los beneficios y costos ambientales con variables tradicionales de beneficio-costos financiero para proveer una perspectiva más amplia en la toma de decisiones.

La metodología general para realizar un balance de energía es un acercamiento de sistemas de "arriba hacia abajo". El primer paso es construir diagramas de los sistemas para organizar la manera de pensar y conocer las relaciones entre los componentes y los flujos de recursos. El segundo paso consiste en la construcción de las tablas de análisis de energía basada en los diagramas descritos anteriormente. Finalmente, se calculan los diferentes índices de energía que relacionan los flujos de energía de la economía con aquellos del medio ambiente, y permiten diagnosticar la viabilidad económica y capacidad de carga de los sistemas en estudio.

Diagramas de sistemas y flujos de energía

Este paso tiene una gran importancia, ya que organiza y agrupa los datos disponibles, permitiendo determinar los flujos e interacciones en el sistema, destacando los más relevantes y poniendo de manifiesto vacíos de información. La escala y el grado de detalle pueden variar dependiendo de los objetivos y del tipo de socio-ecosistema. De la realización de un diagrama adecuado depende la bondad de los resultados. Así, muchas veces, se toman decisiones correctas para una determinada escala aislada que no funcionan, pues no se ha considerado la influencia de componentes superiores que afectan al sistema. Igualmente, pueden producirse efectos inesperados a escalas más detalladas que no se habían detectado a un nivel de resolución dado (Álvarez, 2006).

Capítulo 1

En el diagrama deben señalarse las interacciones entre los componentes en términos energéticos. Existen numerosas fórmulas tabuladas y consensuadas para hacer estos cálculos de cualquier componente (desde la energía solar que afecta a un territorio dado, o la energía mareal, hasta la energía generada por la producción de carbón, electricidad etc.). Así, a partir de un conjunto de bases de datos convencionales (datos de superficie, áreas de uso, población, importaciones y exportaciones etc.), normalmente no cruzadas entre sí, se obtienen flujos de carácter energético.

Según Izursa (2011) los diagramas de sistemas y flujos de energía pueden ser útiles para una mejor comprensión de las leyes de termodinámica, pues se pueden representar los principales flujos de entradas y salidas de energía. Por ejemplo, en la figura I.8 se muestra cómo la energía para producir madera viene de la luz del sol, lluvia, nutrientes, trabajo de la empresa maderera, la maquinaria, entre otros y cómo la mayoría de esta energía sale del sistema como madera y calor que se dispersa. La madera que sale del sistema tiene un grado de energía mayor que el árbol en pie y en esta forma es útil para el hombre.

Como ha señalado Brown (1997), el análisis de energía contabiliza los flujos sociales, económicos y ambientales en unidades comunes con una base objetiva, haciendo posible que los tomadores de decisiones puedan examinar los datos de contabilidad económica y medioambiental antes de tomar decisiones políticas sobre los sistemas ambientales.

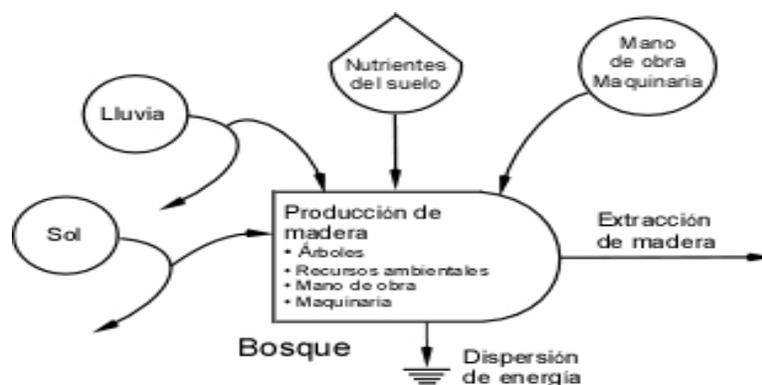


Figura I.8 Flujos de energía necesario para que un bosque produzca madera. Fuente: Álvarez, 2006.

Tablas de análisis de emergía

Estas tablas se generan a partir de los datos del diagrama de flujo, en ellas se calculan las cantidades de Emergía de los distintos componentes y sus valores monetarios emergéticos (valor macroeconómico). En ellas se agrupan los distintos componentes, desde fuentes de energía renovable como el sol o la lluvia hasta recursos no renovables como petróleo, suelo, minerales, o componentes como maquinaria, combustible, mano de obra etc. Todos estos factores tan dispares van a tener unas unidades comunes estandarizadas. En otra columna se sitúa el valor de cada flujo, generalmente expresado en unidades energéticas (julio/unidad de tiempo) y posteriormente se calcula la emergía de cada flujo, para poder tener todos los flujos expresados en unas unidades comunes y estandarizadas (la cantidad de energía total expresada en julios solares necesaria para crear cada uno de ellos) (Álvarez, 2006).

Cálculo de los índices emergéticos

El último paso, una vez obtenidos los datos, es el cálculo de una serie de índices de estado que nos proporcionan información sobre diversas características del sistema estudiado. Permiten establecer comparaciones entre varios escenarios de manejo de un sistema, así como entre diversos sistemas y, por tanto, sirven de apoyo a la gestión. Igualmente, sirven para evaluar la sostenibilidad del sistema, siempre dentro de los criterios del método (Álvarez, 2006).

La tabla I.1 presenta para cada uno de los métodos de balances analizados los alcances y limitaciones con el propósito de destacar la importancia de la inclusión simultánea de estos métodos en la evaluación de la sostenibilidad

Tabla I.1 Alcances y Limitaciones para cada método propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Método	Alcances	Limitaciones
Balance Energético	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se basa en el Primer Principio de la Termodinámica. ✓ Evalúa cantidad de la energía total. ✓ Calcula pérdidas del sistema. ✓ Fácil comprensión del fenómeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene en cuenta la entropía. • No evalúa calidad de la energía. • Proporciona poca información Económico-Ambiental. • Presenta un análisis centrado en las pérdidas.
Balance Exergético	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se basa en el Segundo Principio de la Termodinámica. ✓ Realiza un fuerte análisis termo-económico. ✓ Proporciona información termo-económica. ✓ Estudia el uso de la energía útil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Suma diferentes calidades de energía. • Presenta una mayor dificultad en la comprensión del fenómeno. • Difícil análisis ambiental. • No evalúa ni el tercer ni el cuarto principio de la termodinámica.
Balance Emergético	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se basa en el Tercer y Cuarto Principio de la termodinámica. ✓ Evalúa la sustentabilidad del sistema. ✓ Transforma todo a una misma calidad de energía. ✓ Amplia gama de indicadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Una complicada comprensión del término. • No evalúa cantidad de energía.

Capítulo 2



CAPÍTULO II METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA A PARTIR DE BALANES DE COSTES ENERGÉTICOS

En este Capítulo se desarrolla una metodología general para el cálculo de los balances de costes energéticos (balances de energía, exergía y emergía), para esto primeramente se evaluó los datos necesarios de la composición de los combustibles, sus valores calóricos y la tecnología de aprovechamiento para la evaluación de los balances.

II.1 Metodología multicriterio para el análisis de la biomasa

La figura II.1 presenta a partir de un diagrama la metodología a seguir quedando cada una de las etapas de la siguiente manera. Etapa 1: Descripción de la biomasa. Etapa 2: Descripción de la tecnología de aprovechamiento. Etapa 3: Balances de Costes Energéticos (Energético, Exergético, Emergético). Etapa 4: Análisis e interpretación de los resultados.

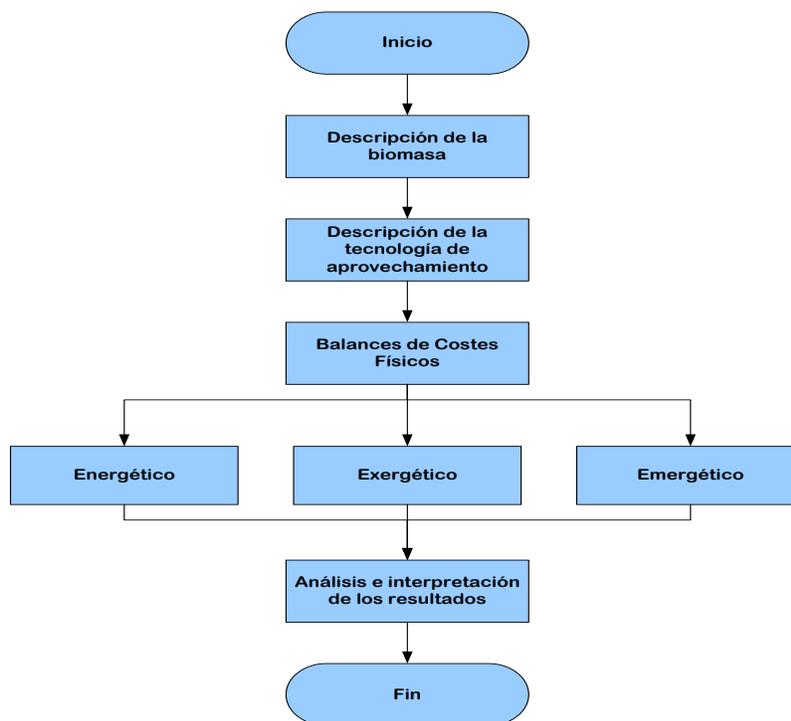


Figura II.1 Metodología propuesta para el análisis de la biomasa como fuente de energía a partir de balances de costes físicos. Fuente: Elaboración propia.

II.1.1 Descripción de la biomasa

La etapa 1 de la metodología general precisa de 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). Estas últimas forman el lastre externo del combustible, mientras que el oxígeno y el nitrógeno forman el interno (Rodríguez, 2000) como se muestra en la figura II.2.

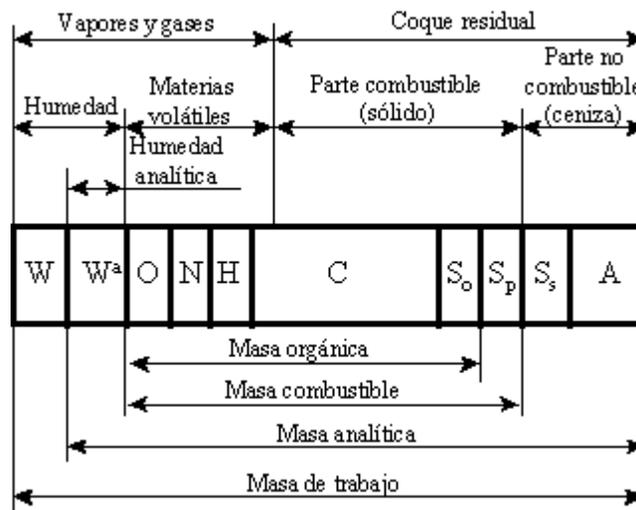


Figura II.2 Composición química de un combustible sólido. Fuente: Rodríguez, 2000.

Además de la composición química existe otro parámetro sumamente necesario para el cálculo tanto energético como exergético, el valor calórico del combustible. Según Rodríguez (2000) es la cantidad de calor que se libera durante la combustión completa de una unidad de masa (o volumen) de combustible. La determinación de esta característica puede realizarse por vía experimental (se utiliza una bomba calorimétrica y se tienen en cuenta las normas establecidas para esta determinación ASTM, GOST, DIN, entre otras) o por vía analítica (se basa en la evaluación por ecuaciones empíricas en función de la composición elemental del combustible).

II.1.2 Selección de la tecnología

Dentro de las tecnologías fundamentales de conversión están presentes la combustión, gasificación, pirólisis, digestión anaeróbica, etc. Cada una de ellas presenta sus propias

Capítulo 2

ventajas y desventajas a su vez que cuenta con una amplia variedad de productos obtenidos a partir de estas tecnologías de conversión. En la tabla II.1 se muestran de manera general las características fundamentales de estas tecnologías de conversión.

Tabla II.1 Características fundamentales de tecnologías de conversión. Fuente: Elaboración propia.

Tecnologías de conversión	Tipo de Biomasa	Ejemplo de combustible usado	Producto principal	Uso-final
Combustión	Biomasa Seca	Biomosas sólidas	Calor	Calor y Electricidad (Turbina de vapor)
Co-firing	Biomasa Seca	Residuos agroforestales	Calor/ Electricidad	Calor y Electricidad (Turbina de vapor)
Gasificación	Biomasa Seca	Pelets y Desechos sólidos	Syngas	Calor (Generador de vapor), Electricidad (Motor, Turbina de Gas)
Pirólisis	Biomasa seca/Biogás	Pelets, Desechos Sólidos	Aceite Pirólisis	Calor (Generador de vapor), Electricidad (Motor)
CHP (Calor y Electricidad Combinado)	Biomasa Seca	Paja, Residuos forestales, Desechos y Biogás	Calor y Electricidad	Uso combinado de Calor y Potencia Eléctrica (Combustión y Gasificación)
Fermentación/Hidrólisis	Azúcar, Almidones, Material Celulósico	Caña de azúcar, Maíz, Biomasa de la madera	Etanol	Combustibles Líquidos, Materias Primas Químicas.
Digestión Anaeróbica	Biomasa Húmeda	Éstiércol, Lodo de Aguas residuales.	Biogás, Bio-productos	Calor (Generador de vapor), Electricidad (Motor, Turbina de Gas)

En la etapa 2 de la metodología es necesario conocer determinados parámetros de funcionamiento de la tecnología a utilizar, tales como la presión y la temperatura de trabajo, la producción de vapor, el consumo de combustible, la temperatura de agua

alimentar, la presión de trabajo de la bomba de agua alimentar, así como los coeficientes de exceso de aire del horno y la caldera.

II.1.3 Balance de energía en el proceso de combustión

En los epígrafes del II.1.3-II.1.5 se presentarán cada una de las particularidades de los balances energéticos, exergéticos y emergético. Las entradas al balance tienen en cuenta fundamentalmente el tipo, composición y cantidad de biomasa y la tecnología a evaluar. El método o procesamiento se corresponde con el balance a aplicar y las salidas principalmente la eficiencia o indicadores de sostenibilidad.

En la figura II.3 se muestra un esquema del balance de energía del proceso de la combustión con el objetivo de conocer la eficiencia energética.

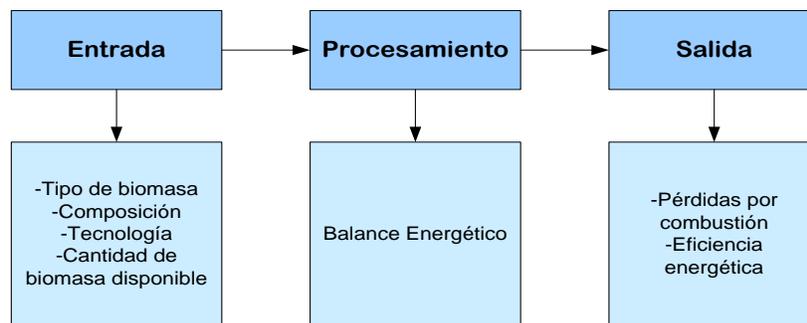


Figura II.3 Esquema del balance energético en el proceso de la combustión. Fuente: Elaboración propia.

El uso eficiente de la energía del combustible en los generadores de vapor está determinado, fundamentalmente, por dos cuestiones: la combustión completa del combustible y el enfriamiento profundo de los gases de combustión.

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

II.1.3.1 Cálculo de la eficiencia energética

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 por lo que es más exacto que el anterior (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 calórico inferior Q_i^t , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_T = \frac{(Q_i^t * I_{gs})}{Q_i^t} * 100 [\%] \quad Ec 2.1$$

El Q_i^t se determina por las ecuaciones 2.2 y 2.3 dependiendo del sistema de unidad y I_{gs} se explica más adelante como determinarlo:

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

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

Método indirecto

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

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

Dónde,

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

q_3 : Por ciento de las pérdidas por incombustión química.

q_4 : Por ciento de las pérdidas por incombustión mecánica.

q_5 : Por ciento de las pérdidas por enfriamiento exterior.

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

El cálculo de todas estas pérdidas de la combustión se efectúa en el Epígrafe II.1.3.2

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.

II.1.3.2 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).

α_{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).

Capítulo 2

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

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

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,

α_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:

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

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

Capítulo 2

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.

$(c\vartheta)_{cen}$: 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:

Capítulo 2

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

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.

$$G_{arr} = G_{arr}^c + G_{arr}^{ch}$$

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:

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

Ec 2.20

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

Ec 2.21

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

Ec 2.22

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

Ec 2.23

Capítulo 2

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

El valor de $G_{\text{arr}}^{\text{c}}$ 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_{esc} , G_{f} , C_{esc} , C_{f} y C_{arr} ; además conocer el porcentaje de la ceniza en la escoria A_{esc} , en el foso A_{f} , y en los arrastres A_{arr} .

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

La cantidad de ceniza del combustible que se introduce en el horno, es igual a 100% como se muestra en la ecuación 2.25:

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

Donde,

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

Los valores de a_{esc} , a_{f} y a_{arr} se determinan por las siguientes fórmulas:

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

$$a_{\text{f}} = \frac{A_{\text{f}}G_{\text{f}}}{A^{\text{t}}B_{\text{c}}} * 100 [\%] \quad \text{Ec 2.27}$$

Luego a_{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 ($G_{\text{arr}}^{\text{c}} + G_{\text{arr}}^{\text{ch}}$). La determinación de G_{arr} se realiza por la siguiente expresión:

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

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

Capítulo 2

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, H₂, CH₄ y otros hidrocarburos C_mH_n.

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:

$$Q_3 = V_{CO}Q_{CO} + V_{H_2}Q_{H_2} + V_{CH_2}Q_{CH_2} + V_{C_mH_n}Q_{C_mH_n} \quad \text{Ec 2.30}$$

Donde,

V_{CO} , V_{H_2} , V_{CH_4} , $V_{C_mH_n}$: Volumen de los gases combustibles en los productos de la combustión; [m³N/kg].

Q_{CO} , Q_{H_2} , Q_{CH_4} , $Q_{C_mH_n}$: Valor calórico volumétrico de cada componente; [kJ/m³N].

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:

$$q_5 = q_5^{nom} \left(\frac{D_v}{D} \right) \quad [\%] \quad \text{Ec 2.32}$$

Donde,

Capítulo 2

q_5^{nom} : Pérdida de calor por enfriamiento externo para capacidad nominal; (%) (ver Tabla II.2).

D: Capacidad de cálculo; (t/h).

Tabla II.2. Pérdida por enfriamiento exterior para calderas de vapor. Fuente: Rodríguez, 2000.

Capacidad nominal de la Caldera		Pérdida de calor q_5^{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,

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

$(ct)_{esc}$: 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.

II.1.4 Balance de exergía en el proceso de la combustión

A continuación, se muestra esquemáticamente el balance de exergía, de manera similar se presentan las entradas al método para la determinación del balance exergético y exergoeconómico (Figura II.4).

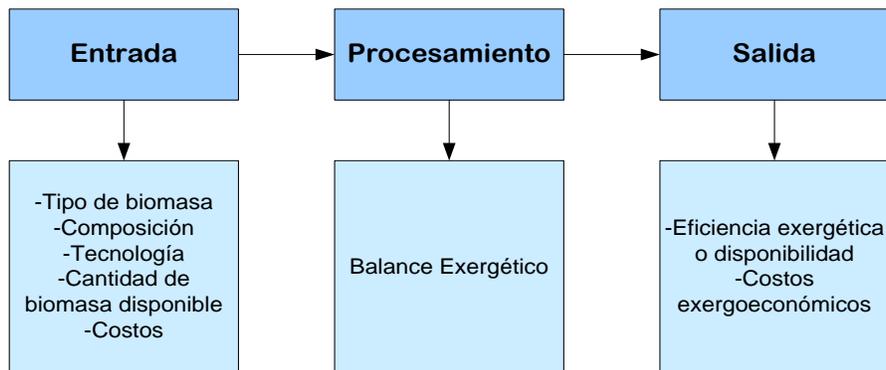


Figura II.4 Esquema del balance exergético en el proceso de la combustión. Fuente: Elaboración propia.

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

En la figura II.5 se muestran las corrientes que intervienen en el generador de vapor para el proceso de combustión.

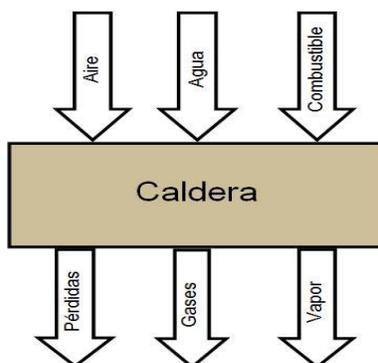


Figura II.5 Corrientes de entrada y salida de una caldera. Fuente: Elaboración propia.

Primeramente se determina la exergía 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} : exergía 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 el exergía 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} : Exergía del agua de alimentar (kW)

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

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

Capítulo 2

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

Donde,

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

\dot{m}_{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_{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_{ge} : Exergía específica de los gases de escape (kg/h)

ρ_{ge} : Densidad de los gases de escape (kg/m³)

V_{ge} : Volumen específico de los gases de escape (m³/kg)

$$E_{\text{ge}} = m_{\text{ge}} * C_p (T_{\text{ge}} - T_o) \quad \text{Ec 2.39}$$

Donde,

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)

T_o : Temperatura del estado de referencia (K)

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

Capítulo 2

$$e_{vs} = (i_{vs} - i_o) - T_o(s_{vs} - s_o) \quad \text{Ec 2.40}$$

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)

$$E_{vs} = m_{\text{vapor}} * e_{vs} \quad \text{Ec 2.41}$$

Donde,

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

m_{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.

$$E_v^{\text{cal}} = (E_{aa} + E_{\text{combustión}} + E_{\text{Combustible}}) - (E_{vs} + E_{ge}) \quad \text{Ec 2.42}$$

Donde,

E_v^{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.

$$\eta_{\text{exerg}}^{\text{gv}} = \frac{E_{\text{sal}}}{E_{\text{ent}}} \quad \text{Ec 2.43}$$

Donde,

E_{ent} : Exergía de las entradas.

E_{sal} : Exergía de las salidas.

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

Capítulo 2

Para realizar el cálculo del costo exergético primeramente se determina el factor de recuperación mediante la ecuación 2.44.

$$FR = \frac{ir(1 + ir)^{Ny}}{(1 + ir)^{Ny} - 1} \quad \text{Ec 2.44}$$

Donde,

FR: Factor de recuperación.

Ir: Tasa de interés (%).

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

Luego se determina el costo zonal utilizando la ecuación 2.45.

$$C_z = \frac{FR}{t_{op}} * C_{inv} \quad \text{Ec 2.45}$$

Donde,

C_z: Costo zonal (\$/h).

t_{op}: Tiempo de operación anual (h/año).

C_{inv}: Costo de la inversión (\$).

Posteriormente se determina el costo exergético del combustible y del agua mediante las ecuaciones 2.46 y 2.47.

$$CE_{comb} = \frac{P_{comb}}{Q_d} \quad \text{Ec 2.46}$$

Donde,

CE_{comb}: Costo exergético del combustible (\$/kJ).

P_{comb}: Precio del combustible (\$/lt).

$$CE_{agua} = \frac{P_{agua}}{e_{aa}} \quad \text{Ec 2.47}$$

Donde,

CE_{agua}: Costo exergético del agua (\$/kJ).

P_{agua} : Precio del agua ($\$/\text{m}^3$).

Utilizando la ecuación 2.48 se determina el costo exergoeconómico del vapor.

$$CE_{vs} = \frac{CE_{\text{comb}} + CE_{\text{agua}}}{\eta_{\text{exerg}}} + \frac{C_z}{E_{vs}} \quad \text{Ec 2.48}$$

Donde,

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

Por último el costo de producción de vapor saturado se determina mediante la ecuación 2.49.

$$Cp_{vs} = \frac{CE_{vs} * E_{vs}}{D_v} \quad \text{Ec 2.49}$$

Donde,

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

II.1.5 Balance de energía en el proceso de combustión

El balance de energía parte del siguiente esquema (Figura II.6), donde se aprecian los recursos renovables, no renovables, materiales de la economía y servicios de la economía que son las diferentes entradas y los indicadores emergéticos que permite obtener este balance.

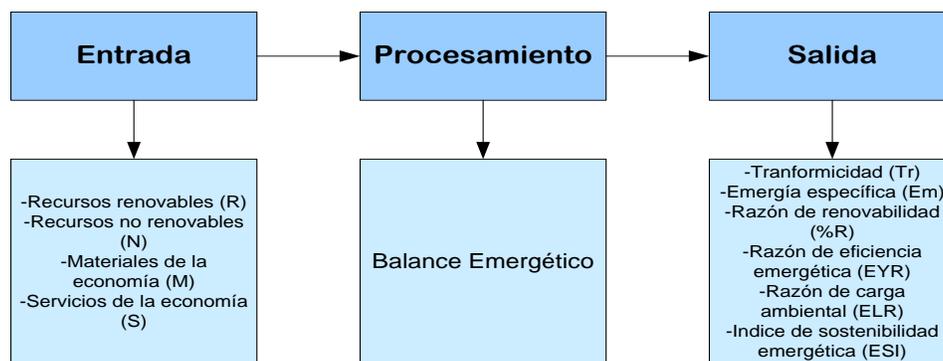


Figura II.6 Esquema del balance energético en el proceso de la combustión. Fuente: Elaboración propia.

Limites espacio-temporales del sistema

Los sistemas termodinámicos son definidos como cualquier región espacial dentro de un límite prescrito seleccionado para su estudio y debe ser establecido para un tiempo determinado puesto que este es un factor que define los flujos que atraviesan el sistema. Esta etapa lo que se precisa es cuál es el objeto de análisis y durante qué período de tiempo se realizará la valoración. El no establecer adecuadamente estas variables puede ocasionar cualquier resultado producto de los errores en cuantificación de insumos y productos que consume y brinda el sistema respectivamente (Valdés, 2017).

Modelación emergética

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

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

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

1. A partir de los límites del sistema se definen las principales entradas y salidas de energía del mismo, y se clasifican según su naturaleza (biogeofísica, económica, humana, etc.), de izquierda a derecha en orden de transformidad creciente alrededor del símbolo de límites del sistema.
2. Se definen los componentes internos del sistema y sus relaciones tanto con las entradas y salidas de materia y energía como entre ellos, teniendo cuidado de implicar todos los elementos del sistema que regulan los procesos que constituyen el funcionamiento del mismo. Se colocan bajo el mismo criterio que en el anterior punto.

3. Se incluyen los flujos de dinero correspondiente al uso económico que puedan tener algunos flujos del sistema, así como las entradas de dinero que mueven algunos de los componentes socio-económicos del mismo.
4. Se incluye la degradación correspondiente a la segunda ley de la termodinámica.
5. Se simplifica el diagrama según los objetivos del estudio mediante una agregación de categorías al nivel de detalle que se quiera llevar a cabo.

Construcción de tablas energéticas

Partiendo del balance energético se procede a la construcción de la tabla energética. Como se muestra en la tabla II.3 esta presenta el orden de cada uno de los flujos y su origen en la primera columna. Luego la segunda muestra el nombre de dichos flujos, la tercera el valor proporcionado por los cálculos de cada flujo, en la cuarta columna figuran sus unidades correspondientes. La quinta columna se refiere a la emergía por unidad (transformicidad o emergía específica), que convierte los valores de la tercera columna a los valores de la sexta columna, llevando todos los valores a una misma unidad de medida, la emergía solar.

Tabla II.3 Ejemplo típico de una tabla energética. Fuente: Lomas, 2009.

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

Las ecuaciones 2.50-2.56 permite calcular los totales de los recursos renovables (R), no renovables (N) y estos comprenden los recursos de la naturaleza (I), además de los materiales de la economía (M), los servicios de la economía, que a su vez comprenden los adquiridos de la economía (F).

Capítulo 2

$$R = \sum_{i=1}^n \text{Recursos renovables} \quad \text{Ec 2.50}$$

$$N = \sum_{i=1}^n \text{Recursos no renovables} \quad \text{Ec 2.51}$$

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Materiales de la economía} \quad \text{Ec 2.52}$$

$$S = \sum_{i=1}^n \text{Servicios de la economía} \quad \text{Ec 2.53}$$

$$I = R + N \quad \text{Ec 2.54}$$

$$F = M + S \quad \text{Ec 2.55}$$

$$Y = I + F \quad \text{Ec 2.56}$$

El aire atmosférico tiene una composición volumétrica de 20,99 % de oxígeno, 78,03 % de nitrógeno, poco menos de 1 % de argón y pequeñas cantidades de varios gases inertes, como vapor de agua, dióxido de carbono, helio, hidrógeno y argón. Para cálculos de ingeniería es por lo general suficientemente exacto incluir todos los gases inertes en el nitrógeno y usar en el análisis 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno. Así pues, en 100 kmoles de aire hay aproximadamente 21 kmoles de O_2 y 79 kmoles de N_2 , o sea la relación molar entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire es 3,76 kmol N_2 / kmol O_2 . La composición gravimétrica del aire es 23,1 % de O_2 , 76,9 % N_2 , en peso, o sea que hay 3,32 kg N_2 /kg O_2 (Moring, 2006).

De acuerdo a lo expresado anteriormente este flujo se separó considerando que parte del aire puede ser asumido como un recurso renovable (R) y parte como un recurso no renovable (N), en este estudio se estimó que el 23,1 % de la masa de aire interviene en la combustión, puesto que no se analizan los gases de la combustión. Por tanto, la fracción de aire no renovable según la ecuación 2.57 tomada de Valdés (2017) queda:

$$F_{\text{aireN}} = \frac{0,231 * \text{Bagazo quemado}}{\alpha_H * \text{Bagazo quemado}} \quad \text{Ec 2.57}$$

Capítulo 2

Luego puede ser determinado el flujo de aire en (J/año) utilizando la ecuación 2.58 y mediante las ecuaciones 2.59 y 2.60 se determina la parte renovable y no renovable respectivamente.

$$V_a \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = \left[V_a \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) * C_p * T_o \right] * \frac{1000J}{\text{kg}} \quad \text{Ec 2.58}$$

$$V_{aR} \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = 0,799 * V_a \left(\frac{J}{\text{año}} \right) \quad \text{Ec 2.59}$$

$$V_{aN} \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = 0,201 * V_a \left(\frac{J}{\text{año}} \right) \quad \text{Ec 2.60}$$

Para el cálculo del flujo de agua en kg/año se utiliza la expresión 2.61.

$$m_{H_2O} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = m_{H_2O} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} \quad \text{Ec 2.61}$$

Según Valdés (2017) una persona consume 2 500 kcal de energía metabolizada/día y considerando 8 horas de trabajo la estimación de la labor humana se puede determinar a partir de la ecuación 2.62.

$$\text{Labor} \left(\frac{J}{\text{año}} \right) = \left(\frac{\text{obreros h}}{\text{año}} / \frac{8 \text{ obreros h}}{\text{año}} \right) * 2500 \frac{\text{kcal}}{\text{día}} * 4186 * \frac{J}{\text{kcal}} \quad \text{Ec 2.62}$$

Los flujos de costos del agua y del combustible a utilizar se determina a partir de las ecuaciones 2.63 y 2.64

$$m_{H_2O} \left(\frac{\text{CUC}}{\text{año}} \right) = m_{H_2O} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} * P_{\text{agua}} \left(\frac{\text{CUC}}{\text{m}^3} \right) * \frac{1\text{g}}{1000\text{kg}} \quad \text{Ec 2.63}$$

$$m_{\text{comb}} \left(\frac{\text{CUC}}{\text{año}} \right) = m_{\text{comb}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} * P_{\text{comb}} \left(\frac{\text{CUC}}{\text{kg}} \right) * \frac{1\text{g}}{1000\text{kg}} \quad \text{Ec 2.64}$$

Cálculo de los indicadores:

Como se declaró anteriormente el análisis emergético clasifica las entradas del sistema en recursos renovables (R), no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (F). Esto permite el cálculo de una serie de índices que nos brinda información sobre diversas características del sistema, permite establecer comparaciones entre varios escenarios para el manejo del mismo, así como la

comparación entre diversos sistemas. A continuación, se muestran estos indicadores detalladamente.

La transformicidad (Tr) expresa la cantidad de recursos necesarios para la obtención de un producto específico (Sánchez, 2006). Es la relación entre la energía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (Ep), su unidad es en seJ. Este índice revela una cualidad del sistema, cuanto mayor Tr más energía se requiere para generar productos. Puede interpretarse como el valor inverso de la eficiencia de un agro ecosistema (Y) energía incorporada por el sistema y (E) energía del recurso (Aguilar, 2015). En la ecuación 2.65 se presenta la determinación de la transformicidad.

$$Tr = \frac{Y}{E_p} \quad \text{Ec 2.65}$$

La energía específica se define como la energía total (Y) por unidad de masa de los productos de salida (P) por lo que su unidad es usualmente seJ/g. Como la energía es requerida para concentrar los materiales esta unidad de valor energético (UEV) incrementa con la concentración de las sustancias. Los elementos y compuestos poco abundantes en la naturaleza por consiguiente tienen una energía específica mayor cuando se encuentran concentrados dado que más trabajo fue requerido para concentrarlos, espacial y químicamente (Brown, 2004). Esta energía específica puede ser obtenida a partir de la ecuación 2.66.

$$Em = \frac{Y}{P} \quad \text{Ec 2.66}$$

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

Capítulo 2

rendimiento (%R) son ecológicamente sostenibles. Este índice se determina por la ecuación 2.67.

$$\%R = \frac{R}{Y} * 100 \quad \text{Ec 2.67}$$

La razón de eficiencia energética es una medida de la habilidad del proceso para explotar y hacer disponible los recursos naturales por la inversión externa. Provee una mirada al proceso desde una perspectiva diferente ya que analiza la apropiación de los recursos locales lo que se interpreta como una contribución adicional a la economía. El valor menor posible del EYR es 1, que indica que un proceso entrega la misma cantidad de energía que fue provista para su operación por lo que no fue capaz de explotar recursos naturales. Por consiguiente, procesos con EYR iguales a 1 o ligeramente superior no retroalimentan a la economía significativamente en términos energéticos y solo transforman recursos que estaban disponibles de procesos previos por lo que, al hacer esto actúan más como procesos consumidores que como procesos creadores de oportunidades para el crecimiento del sistema (Brown, 2004). La ecuación 2.68 muestra la manera de calcular este índice.

$$\text{EYR} = \frac{R + N + F}{F} \quad \text{Ec 2.68}$$

La razón de carga ambiental es la relación entre la suma de los recursos no-renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R), es adimensional. Cuando el valor del índice es alto, mayor será el impacto ambiental del sistema. También indica que los costos de producción son más altos, y por lo que su precio final se incrementara, haciendo que el producto o zonas productoras sean menos competitivos en el mercado con una relación de carga ambiental más baja (Aguilar, 2015). Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos (Cano, 2012). Mediante la ecuación 2.69 se puede obtener este indicador.

$$\text{ELR} = \frac{N + F}{R} \quad \text{Ec 2.69}$$

Capítulo 2

Si el ELR y el EYR se combinan se crea un índice de sostenibilidad siendo una medida de la potencial contribución del sistema (EYR) por unidad de carga impuesta al sistema local (ELR). Este indicador (ESI) es útil para medir la apertura y los cambios de carga ocurridos a través del tiempo en procesos tecnológicos y economías (Brown, 2004). Este índice se determina usando la ecuación 2.70.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

Ec 2.70

Capítulo 3



CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se desarrolla la metodología general de la investigación propuesta en el Capítulo II, mediante la cual se muestra la composición química de los combustibles que serán evaluados (bagazo y residuos agrícolas cañeros) en una caldera de tipo RETAL y se muestran sus principales parámetros de trabajo. Además, se lleva a cabo el cálculo de los tres balances de costes energéticos (energético, exergético y emergético), para la posterior comparación de los resultados desde un punto de vista multicriterio.

III.1 Descripción de la biomasa

La producción de caña de azúcar asciende a aproximadamente a 25 MM de toneladas anuales, de las cuales casi el 50% es bagazo y residuos agrícolas cañeros (RAC) con elevado potencial para la producción de energía. Es posible utilizar los residuos mencionados para la producción de energía y favorecer la sostenibilidad de la industria azucarera (Arteaga, 2014), por lo tanto las biomásas que se utilizarán en este estudio son el bagazo y el RAC, debido a que son las más comunes en el territorio de Cienfuegos, los totales de los últimos años se muestra en los Anexo 3 y Anexo 4 provocado por el desarrollo que presenta la industria azucarera. Además en los Anexo 5 y Anexo 6 se muestran como se procesan estas biomásas.

El creciente desarrollo de la industria de los derivados de la azúcar y el tradicional compromiso energético del bagazo comienzan a adquirir una relevante significación económica. El bagazo se usó históricamente como combustible en la industria azucarera, aunque su valor calórico es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay dudas de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen grandes disponibilidades de combustible y a la vez son buenos productores de azúcar de caña. Se ha demostrado la posibilidad de satisfacer las demandas energéticas de un central con casi la mitad del bagazo que produce, por lo que el sobrante puede ser utilizado como materia prima. Además, en la producción de derivados, el bagazo se ha considerado tradicionalmente

como sustituto del fuel-oil, pues para obtenerlo es necesario quemar dicho combustible en el central azucarero.

Los RAC han cobrado en los últimos años un gran interés como material combustible para los centrales azucareros, con el objetivo de eliminar el petróleo y la leña como combustibles adicionales o para ahorrar bagazo y suministrarlo como materia prima a otras industrias, también han servido para suplir déficit energéticos en los centrales producto de inestabilidades en la molida. Adicionalmente constituyen un extraordinario potencial para la generación de electricidad en los propios ingenios o termoeléctricas. Estos constituyen un combustible renovable cada año y su potencial - obteniéndolos en centros de acopio y limpieza - es equivalente a 0,12 millones de toneladas de combustible convencional, por cada millón de toneladas de azúcar crudo que se produzca, (Hernández, 2017)

En la tabla III.1 se muestran los valores de la composición química de los recursos anteriormente mencionados y se observa que el bagazo presenta un porcentaje de humedad alto (50%) en comparación con los RAC (15%).

Tabla III.1: La composición química de diferentes biomásas cañeras en Cuba. Fuente: Rodríguez, 2000.

Biomasa	W (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	A (%)
Bagazo	50	23,5	3	22,9	0,065	0,02	0,5
RAC	15	37,145	4,888	37,672	0,187	0,051	5,058

III.2 Descripción de la tecnología

Como se explicó anteriormente Cuba es uno de los principales exportadores de azúcar del mundo y Cienfuegos es una de las provincias con mayor desarrollo en este sector y cuenta con cinco centrales, por tal motivo la tecnología de aprovechamiento energético para evaluar las biomásas seleccionadas es los generadores de vapor tipo RETAL, que son los de mayor presencia en los centrales para la combustión de bagazo en nuestro país. En la figura 3.1 se muestra el esquema de una caldera de tipo RETAL y las zonas que la componen (1-humedad del bagazo, 2-temperatura y presión del vapor

Capítulo 3

sobrecalentado, 3-temperatura de gases de salida del sobrecalentador, 4-Presión del vapor del domo, 5-Temperatura de gases de salida y captación de residuos volátiles, 6-temperatura y presión del agua de alimentar, 7-captación de residuos en ceniceros, 8-temperatura y humedad del aire frío.), otro diagrama de la tecnología se muestra en el Anexo 7, en la tabla III.2 se exponen sus principales parámetros de operación.

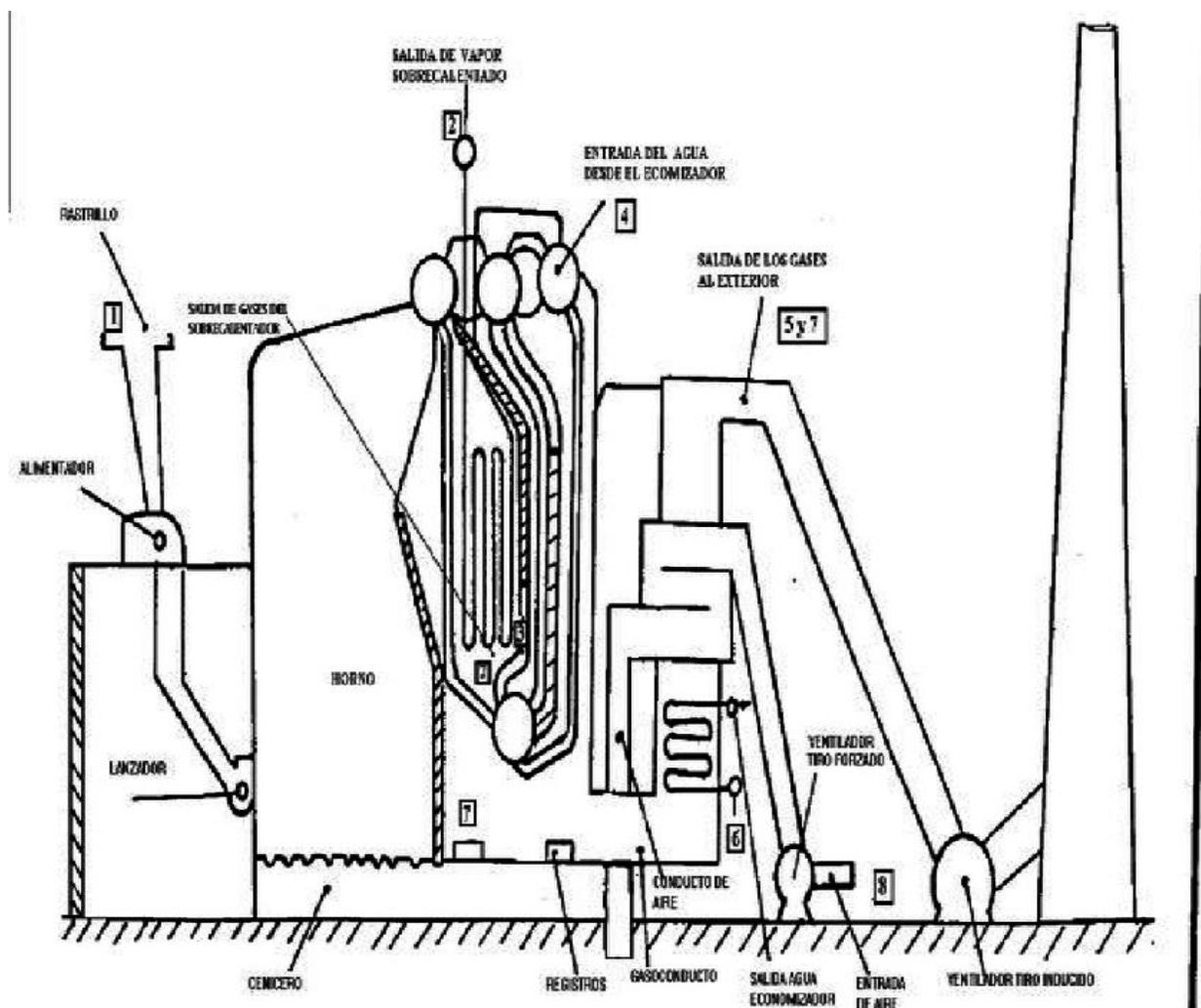


Figura III.1 Esquema de una caldera tipo RETAL. Fuente: Vizcón, 1997.

Tabla III.2 Parámetros de trabajo de una caldera RETAL.

Parámetros	Valor
Presión	1.9 MPa
Temperatura	320 °C
Producción de vapor	45 t/h
Consumo de combustible para el Bagazo	22 t/h
Temperatura agua a alimentar	80 °C
Presión de la bomba de agua alimentar	3 MPa

III.3 Análisis energético

Partiendo de la figura II.3, para el análisis energético se evaluaron como biomasa el bagazo y bagazo-RAC (50% de bagazo y 50% de RAC) con el fin de conocer los valores de eficiencia energética y las diferentes pérdidas que ocurren en el proceso de la combustión. En este epígrafe se muestran todos los cálculos del balance energético.

III.3.1 Determinación del poder calórico de los combustibles

Para determinar el Poder Calórico Inferior de cada combustible se aplica la ecuación 2.2. Para el caso de la combinación de bagazo-RAC primeramente es necesario conocer el flujo que tendrá cada combustible (Ec 3.1), luego se realiza el análisis gravimétrico de los combustibles (Ec 3.2, Ec 3.3) para conocer su influencia en la combustión y poder determinar el poder calórico inferior a partir de la ecuación 3.4.

Los resultados del consumo de combustible para la combinación (Bagazo-RAC) se muestra en la tabla III.3 y los poderes calóricos para ambas alternativas en la tabla III.4.

$$B_c = \left[\left(B_{c_{bagazo\ 100\%}} * Q_{i_{bagazo}}^t \right) * 0,5 \right] / Q_{i_{RAC}}^t \quad (\text{kg/h}) \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde,

$B_{c_{bagazo\ 100\%}}$: Consumo de combustible de la caldera para la combustión de 100% bagazo.

Capítulo 3

$$g_{\text{bagazo}} = B_{C_{\text{bagazo } 50\%}} / (B_{C_{\text{bagazo } 50\%}} + B_{C_{\text{RAC } 50\%}}) \quad \text{Ec 3.2}$$

$$g_{\text{RAC}} = (1 - g_1) \quad \text{Ec 3.3}$$

Donde,

g_{bagazo} y g_{RAC} : Valores gravimétricos del bagazo y el RAC respectivamente.

$B_{C_{\text{bagazo } 50\%}}$: Flujo másico del bagazo para la combinación bagazo-RAC.

$B_{C_{\text{RAC } 50\%}}$: Flujo másico del RAC para la combinación bagazo-RAC.

$$X = g_1 * x_{\text{bagazo}} + g_2 * x_{\text{RAC}} \quad \text{Ec 3.4}$$

Donde,

x_{RAC} : Parámetro del RAC.

x_{bagazo} : Parámetro del bagazo.

X: Parámetro de la combinación bagazo-RAC a conocer.

Tabla III.3 Consumo de combustible para la combustión bagazo-RAC en ton/h. Fuente:

Elaboración propia.

Bagazo	RAC
11	6,15

Tabla III.4 Poder Calorífico Inferior de los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

	Bagazo	Bagazo-RAC
Poder calorífico inferior (kJ/kg)	7 360,95	9444,01

III.3.2 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 bagazo y para el caso de la combustión de bagazo-RAC se utiliza la ecuación 3.4. La tabla III.5 muestra los resultados obtenidos.

Tabla III.5: Volúmenes teóricos de los productos de la combustión y del aire para los combustibles. Fuente: Elaboración propia.

Combustible	Volúmenes teóricos de los combustibles			
	V°RO ₂	V°N ₂	V°H ₂ O	V°a
Bagazo	0,44	1,68	1,01	2,12
Bagazo-RAC	0,53	2,02	0,94	2,56

III.3.3 Características equivalentes para el contenido de ceniza de los combustibles

La determinación de la característica equivalente para el contenido de ceniza como fue determinado a partir de la ecuación 2.17 y en la tabla III.6 se muestra los resultados para los diferentes tipos de combustibles.

Tabla III.6: Contenido equivalente de ceniza para los combustibles. Fuente: Elaboración Propia.

Contenido equivalente de ceniza A ^E (% kJ/kg)	
Bagazo	0,07
RAC	0,38

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 por lo que no es necesario tenerla en cuenta en el cálculo de la entalpia.

III.3.4 Determinación del coeficiente exceso de aire a la salida del horno y de la caldera

Según Barroso (2003), α_c , para este caso, puede ser calculado como:

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

Ec 3.5

Dónde,

α_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 (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 (α_{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 3.5 el exceso de aire en la caldera es de 2,0.

III.3.5 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.7 se muestran los valores de dichas entalpías.

Tabla III.7 Entalpías específicas de los productos de la combustión y el aire en (kJ/kg). Fuente: Elaboración propia.

(c ϑ) RO ₂	385,5
(c ϑ) N ₂	278,28
(c ϑ) H ₂ O	325,72
(c ϑ) Aire	286,83

III.3.6 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 luego mediante la ecuación 3.4 se

determinan para el bagazo-RAC. En la tabla III.8 se muestran las entalpías de aire frío y de los gases de salida.

Tabla III.8 Entalpías para las diferentes biomásas (kJ/kg). Fuente: Elaboración propia.

	Bagazo	Bagazo-RAC
Entalpía de los gases de salida (I_{gs})	1 583,31	1 820,43
Entalpía del volumen teórico de aire frío a la temperatura de 30 °C (I_{af}^0)	84,47	101,92
Entalpía del volumen teórico de los gases de la combustión (I_g^0)	963,51	1 072,58
Entalpía del aire en exceso (I_{exc}^a)	608,74	734,50
Entalpía del volumen de vapor de agua en exceso ($I_{\Delta H_2O}$)	11,06	13,35
Entalpía del volumen teórico de aire necesario (I_a^0)	608,74	734,50

III.3.7 Determinación de las pérdidas mediante la combustión

El porcentaje de las pérdidas por los gases de escape (q_2) se determina a partir de la ecuación 2.5 para los dos combustibles evaluados, las demás pérdidas debido a la falta de datos no se pueden determinar por la metodología expuesta en el capítulo II, sin embargo en el caso de la combustión de bagazo el porcentaje de pérdidas por incombustión mecánica (q_4) y el porcentaje de pérdidas por enfriamiento exterior (q_5) fueron extraídos del modelo matemático de Barroso (2003) que fue realizado a una caldera de tipo RETAL con las mismas características a la tomada en este estudio. Para el caso del bagazo-RAC se tomaran los mismos valores de pérdidas aunque considerando un cierto error. En la tabla III.9 se muestran los valores de las pérdidas para los diferentes combustibles.

Tabla III.9 Pérdidas en el proceso de la combustión para las diferentes combustiones en %.

Fuente: Elaboración propia.

Pérdidas	Bagazo	Bagazo/RAC
q₂	18,83	16,76
q₄	2	2
q₅	1,5	1,5

En la tabla anterior se puede observar que la mayor pérdida q_2 lo representa la combustión de bagazo (18,83%) y la combustión de bagazo-RAC presenta el (16,76%). Las restantes pérdidas se comportaron de manera similar.

III.3.8 Determinación de la eficiencia energética por el método directo e indirecto.

Una vez determinadas las pérdidas, utilizando la ecuación 2.1 y 2.4 se determina la eficiencia por el método directo e indirecto mostrado en la tabla III.10.

Tabla III.10 Valores de eficiencia energética por ambos métodos en %. Fuente: Elaboración propia.

Eficiencia energética	Bagazo	Bagazo/RAC
Método Indirecto	77,67	79,72
Método directo	78,5	80,72

Como se observa la eficiencia calculada por el método directo es mayor a la calculada por el método indirecto, debido a que este último toma en cuenta un número de pérdidas (q_2 , q_3 , q_4) etc., que no toma en cuenta el método directo. Los valores más bajos de eficiencia los representa la combustión de bagazo con un 77,67% por el método indirecto y 78,5 % por el directo y los más altos la combustión de bagazo-RAC con 79,72 % por el método indirecto y 80,72 % por el directo.

III.4 Análisis exergético

Los pasos a seguir para el análisis exergético al igual que para el energético se evaluaron para una caldera de tipo RETAL considerando bagazo y bagazo-RAC, con el propósito de conocer el valor de su eficiencia exergética y diferentes costos exergoeconómicos (Figura II.4). En este epígrafe se muestran todos los cálculos para el balance exergético.

III.4.1 Determinación de las entalpías y entropías de las entradas y salidas.

Primeramente 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.11, III.12 y III.13 se muestran los valores de entalpía, entropía y las condiciones de los gases de escape respectivamente.

Tabla III.11 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})	337,36
Entalpía a las condiciones de referencia (h_o)	113,28
Entalpía del vapor saturado (l_{vs})	2 700,59
Entalpía del Bagazo (h_{comb})	7 360,95
Entalpía del Bagazo/RAC (h_{comb})	9 444,01

Tabla III.12 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})	1,07
Entropía a las condiciones de referencia (S_o)	0,39
Entropía del vapor saturado (S_{vs})	5,53

Tabla III.13 Condiciones de los gases de escape. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Software CLSTC.

Densidad de los gases de escape (kg/m ³)	9,42
Volumen específico de los gases de escape (m ³ / kg)	0,11
Calor específico de los gases de escape (kJ/kgK)	3,01

III.4.2 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.14.

Tabla III.14 Exergías específicas en kJ/kg. Fuente: Elaboración propia.

Agua de alimentar (e_{aa})	20,50
Gases de escape (m_{ge})	21 974,44
Vapor saturado (e_{vs})	1 044,71

III.4.3 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 el caso de combustión de bagazo, luego mediante la ecuación

3.4 se determina para el caso de bagazo-RAC. En la tabla III.15 se muestran los valores de las exergías calculadas.

Tabla III.15 Exergía de entrada y salida del sistema. Fuente: Elaboración propia.

Exergía (kJ/h)	
Exergía del agua alimentar (E_{aa})	922 590
Exergía de los gases de escape (E_{ge})	12 161 861,48
Exergía del vapor producido por la caldera (E_{vs})	47 011 905
Exergía del Bagazo ($E_{combustible}$)	161 940 900
Exergía de la combustión para el bagazo ($E_{combustión}$)	161 940 900
Exergía del Bagazo/RAC ($E_{combustible}$)	87 461 106,5
Exergía de la combustión para el bagazo-RAC ($E_{combustión}$)	87 461 106,5

III.4.4 Determinación de las pérdidas y eficiencia exergética

Una vez obtenidas las exergías de las entradas y las salidas se determinan las pérdidas exergéticas a partir de la ecuación 2.42 y la eficiencia exergética mediante la ecuación 2.43. En la tabla III.16 se muestran los valores de pérdidas y eficiencia evaluados.

Tabla III.16 Valores de pérdidas y de eficiencia exergética. Fuente: Elaboración propia.

	Bagazo	Bagazo/RAC
Pérdida de exergía en el generador de vapor (kJ/h)	103 689 723,5	29 209 930,02
Eficiencia exergética del generador de vapor (%)	18,22	33,65

Como se puede observar en la tabla III.15 los valores menores de pérdidas los representa la combinación de bagazo-RAC (29 209 930,02 kJ/h) ocasionando así la disponibilidad más alta (33,65%), en cambio la combustión de bagazo presenta los valores más altos de pérdidas (103 689 723,5 kJ/h) y por lo tanto presenta una menor eficiencia exergética o disponibilidad (18,22%).

III.4.5 Datos preliminares para el cálculo exergoeconómico

En la tabla III.17 se exponen los valores preliminares para el cálculo exergoeconómico, tomados de (Lobelles, 2015), que realizó un estudio a una caldera de tipo RETAL.

Tabla III.17 Datos preliminares para el cálculo exergoeconómico. Fuente: Elaboración propia.

Tasa de interés (Adimensional)	0,1
Tiempo de vida útil (año)	25
Tiempo de operación anual (h/año)	2 800
Costo de la inversión (CUC)	115 000
Precio del agua (CUC/m³)	0,33
Precio del Bagazo (CUC/ton)	1,50
Precio del RAC (CUC/ton)	7,53

III.4.6 Cálculo de los costos exergoeconómicos

Partiendo de los datos preliminares se determinan los diferentes costos exergoeconómicos de las biomásas evaluadas utilizando las ecuaciones 2.46, 2.47, 2.48 y 2.49 para determinar el costo exergético del combustible, del agua, del vapor y de producción de vapor respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla III.18.

Tabla III.18 Costos exergoeconómicos calculados. Fuente: Elaboración propia.

Costo exergético del Bagazo (CUC/kJ)	2,0378E-07
Costo exergético del RAC (CUC/kJ)	7,3361E-07
Costo exergético del agua (CUC/kJ)	1,6096E-05
Costo exergoeconómico del vapor (Bagazo) (CUC/kJ)	8,9566E-05
Costo exergoeconómico del vapor (Bagazo/RAC) (CUC/kJ)	6,4090E-05
Costo de producción del vapor (Bagazo) (CUC/ton)	93,57
Costo de producción del vapor (Bagazo/RAC) (CUC/ton)	80,26

Como se puede observar el bagazo presenta el mayor costo exergético, repercutiendo así que sea el que presente mayor costo exergoeconómico del vapor (8,9566E-05 CUC/kJ) y el de mayor costo de producción de vapor (93,57 CUC/ton), por otra parte la combinación de bagazo-RAC presenta menor costo exergoeconómico del vapor y de producción de vapor (6,4090E-05 CUC/kJ, 80,26 CUC/ton respectivamente).

III.5 Análisis emergético

El análisis emergético se evaluó bajo las mismas condiciones que los casos anteriores con el propósito de conocer los diferentes indicadores emergéticos expuestos en la Figura II.6. En este epígrafe se muestran todos los cálculos para el balance emergético.

III.5.1 Límites espacio temporales del estudio

El objeto de estudio para el análisis emergético se centra en el proceso de combustión que ocurre en la caldera de tipo RETAL, por lo que las principales corrientes de entrada son aire, agua y combustible (bagazo, bagazo-RAC), además se tiene en cuenta materiales y servicios de la economía tales como costo de mantenimiento y labor humana, en cuanto a las salidas se tiene únicamente en cuenta el vapor generado durante dicho proceso, en cuanto al tiempo se toma un período de un año.

III.5.2 Modelación del sistema

En la modelación se clasifican las principales corrientes de entradas al sistema en recursos renovables (R), recursos no renovables (N), materiales de la economía (M) y servicios de la economía (S). En la tabla III.19, III.20 se muestran los flujos de estas corrientes y su clasificación para la combustión de bagazo y bagazo-RAC respectivamente. El flujo de aire en (kg/año) que interviene en la combustión se determinó a partir de la ecuación 3.6.

$$V_{\text{aire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) = V_a^0 * \alpha_H * Bc * \rho_{\text{aire}} * 2800 \frac{\text{h}}{\text{año}} \quad \text{Ec 3.6}$$

Donde,

ρ_{aire} : Densidad del aire a condiciones ambientales.

Capítulo 3

Luego despejando en la ecuación 2.58 se obtiene el flujo de aire en J/año y posteriormente mediante las ecuaciones 2.59 y 2.60 se determina que parte es renovable y cual es no renovable. Además los flujos de agua, labor humana, costo del agua y costo de recogida y transportación (RT) de los combustibles se determinan utilizando las ecuaciones 2.61, 2.62, 2.63 y 2.64 respectivamente.

Tabla III.19 Clasificación de las principales entradas del sistema para el bagazo. Fuente:
Elaboración propia.

Nombre	Flujo	Unidades/año	Clasificación
Aire	7,5453E+13	J	R
Bagazo	6,1600E+07	kg	R
Aire	9,8529E+12	J	N
Agua	1,2600E+08	kg	N
Costo de RT del bagazo	9,2400E+07	\$	M
Costo del agua	4,1580E+04	\$	M
Mantenimiento	2,8000E+02	\$	S
Labor Humana	1,2056E+10	J	S

Capítulo 3

Tabla III.20 Clasificación de las principales entradas del sistema para el bagazo-RAC. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Flujo	Unidades/año	Clasificación
Aire	9,7185E+13	J	R
Bagazo	3,0800E+07	kg	R
RAC	1.7224E+07	kg	R
Aire	1,2791E+13	J	N
Agua	1,2600E+08	kg	N
Costo de RT del bagazo	4,6200E+07	\$	M
Costo de RT del bagazo-RAC	2,3192E+08	\$	M
Costo del agua	4,1580E+04	\$	M
Mantenimiento	2,8000E+02	\$	S
Labor Humana	1,2056E+10	J	S

La figura III.2 muestra el diagrama energético del bloque de generación, partiendo de la información dada anteriormente y utilizando el Anexo 8, donde se muestra la simbología energética.

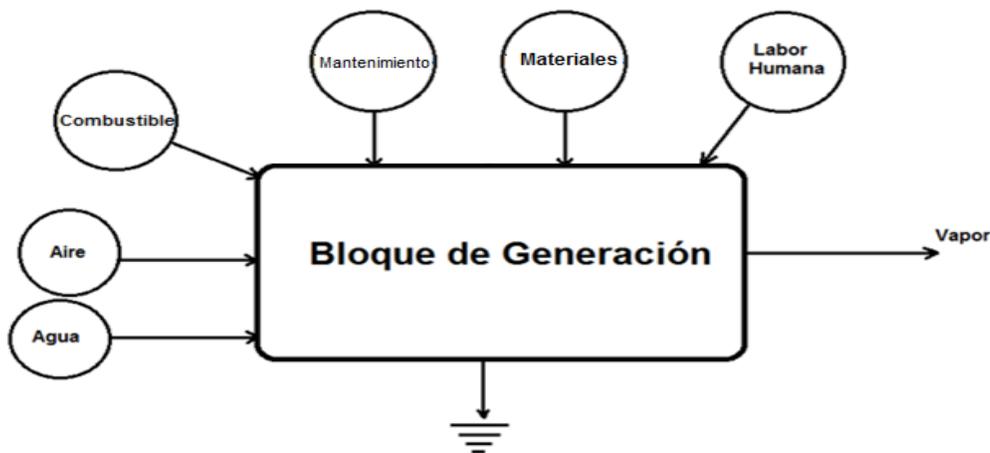


Figura III.2 Diagrama energético del bloque de generación. Fuente: Elaboración propia.

Este diagrama permite visualizar con más detalle la influencia de los flujos de entrada en el sistema y su salida en forma de vapor en el bloque de generación, además de la degradación de energía que ocurre en todo proceso.

III.5.3 Resultados de la tabla emergética

Partiendo de los datos de las tablas III.19 y III.20 y utilizando las diferentes transformidades que se muestran en la tabla III.21 se construye la tabla emergética de los casos de estudio y se muestran en la tabla III.22 para el caso del bagazo y en la III.23 para el caso del bagazo-RAC.

Para determinar la emergía específica de los RAC se utilizó la Segunda regla del álgebra emergética (Ver Anexo 9), según Abreu (2017) la emergía total del proceso de producción de la caña de azúcar es de $1,2300E+06$ seJ/año y la emergía específica de la caña de azúcar es de $3,9200E+08$. El RAC representa 0,12 toneladas por toneladas de caña, luego utilizando la ecuación 3.7 se determinó la cantidad de kg de RAC que se produce en el proceso y mediante la ecuación 3.8 se determinó su emergía específica.

$$\text{Cantidad RAC} = \frac{\text{Emergía total}}{\text{Emergía esp}_{\text{caña}}} * 0,12 \quad (\text{kg}) \quad \text{Ec 3.7}$$

Donde,

Cantidad RAC: Cantidad de RAC que se obtiene en el proceso.

Emergía total: Emergía total del proceso.

Emergía esp_{caña}: Emergía específica de la caña.

$$\text{Emergía esp}_{\text{RAC}} = \frac{\text{Emergía total}}{\text{Cantidad RAC}} \quad (\text{seJ/kg}) \quad \text{Ec 3.8}$$

Capítulo 3

Tabla III.21 Transformidad y la bibliografía de la que fue tomada. Fuente: Elaboración propia.

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

Tabla III.22 Tabla emergética para el bagazo. Fuente: Elaboración propia.

Nota	Ítem	Flujo	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
Recursos renovables de la naturaleza (R)					5,8836E+20
1	Aire	7,5453E+13	J/año	9,8200E+02	7,4095E+16
2	Bagazo	6,1600E+10	g/año	9,5501E+09	5,8829E+20
Recursos no renovables de la naturaleza (N)					7,8048E+16
3	Aire	9,8529E+12	J/año	9,8200E+02	9,6755E+15
4	Agua	1,2600 E+11	g/año	5,4264E+05	6,8373E+16
Materiales de la economía (M)					4,2523E+20
5	Costo de RT del bagazo	9,2400E+07	\$/año	4,6000E+12	4,2504E+20
6	Costo del agua	4,1580E+04	\$/año	4,6000E+12	1,9127E+17
Servicios de la economía (S)					4,8667E+16
7	Mantenimiento	2,800E+02	\$/año	4,6000E+12	1,2880E+15
8	Labor Humana	1,2056E+10	J/año	3,9300E+06	4,7379E+16
Emergía total (Y)					1,01372E+21

Capítulo 3

Como se observa en el caso de la combustión de bagazo el mayor flujo emergético proviene de los materiales de la economía (5,8836E+20 seJ/año) y representa un 58,04% de la emergía total, por otro lado la emergía aportada por los servicios de la economía representa la emergía más baja (4,8667E+16) representa tan solo un 0,005% de la emergía total.

Tabla III.23 Tabla emergética para el bagazo-RAC. Fuente: Elaboración propia.

Nota	Ítem	Flujo	Unidad	Transformidad (seJ/unidad)	Emergía solar (seJ/año)
Recursos renovables de la naturaleza (R)					3,5050E+20
1	Aire	9,7185E+13	J/año	9,8200E+02	8,9403E+16
2	Bagazo	3,0800E+10	g/año	9,5501E+09	2,9414E+20
3	RAC	1,7224E+10	g/año	3,2667E+09	5,6264E+19
Recursos no renovables de la naturaleza (N)					8,0047E+16
4	Aire	1,2691E+13	J/año	9,8200E+02	1,1674E+16
5	Agua	1,2600 E+11	g/año	5,4264E+05	6,8373E+16
Materiales de la economía (M)					8,0930E+20
6	Costo de RT del bagazo	4,6200E+07		\$/año 4,6000E+12	2,1252E+20
7	Costo de RT del RAC	1,2969E+08		\$/año 4,6000E+12	5,9659E+20
8	Agua	4,1580E+04		\$/año 4,6000E+12	1,9127E+17
Servicios de la economía (S)					4,8667E+16
9	Mantenimiento	2,8000E+02		\$/año 4,6000E+12	1,2880E+15
10	Labor Humana	5,8604E+09	J/año	3,9300E+06	4,7379E+16
Emergía total (Y)					1,1599E+21

Como se muestra en la tabla anterior para la combustión de bagazo-RAC no ocurre lo mismo que para el caso del bagazo solo, debido a que el mayor flujo emergético proviene de los materiales de la economía ($8,0930E+20$ seJ/año) y representa un 69,77% de la emergencia total, en cambio la emergencia menor es la aportada por los servicios de la economía ($4,8667E+16$ seJ/año) y representa un 0,004%.

III.5.4 Análisis de los indicadores

El producto obtenido en el sistema es el vapor producido por la caldera, en la tabla III.24 se muestra su emergencia específica tanto para la combustión de bagazo como para bagazo-RAC y se determina a partir de la ecuación 2.66.

Tabla III.24 Emergencia específica del vapor producido. Fuente: Elaboración propia.

Producto	Producción (g/año)	Emergencia específica
Vapor (Bagazo)	1,2600E+11	8,0454E+09
Vapor (Bagazo-RAC)	1,2600E+11	9,2058E+09

Como se observa en la tabla anterior la emergencia específica del vapor producido por la combustión de bagazo ($8,0454E+09$ seJ/g) es menor a la del vapor producido por el bagazo-RAC ($9,2058E+09$ seJ/g) lo que demuestra que para el primer caso menos invierte el sistema y es más sostenible, en comparación con el segundo caso.

En la tabla III.25 se muestran los diferentes indicadores emergéticos del proceso para la combustión de bagazo y bagazo-RAC determinados a partir de las ecuaciones 2.67-2.70.

Tabla III.25 Indicadores emergéticos para la combustión de bagazo. Fuente: Elaboración propia.

Indicadores	Bagazo	Bagazo-RAC
Razón de renovabilidad (%R)	58,04	30,22
Razón de eficiencia emergética (EYR)	2,38	1,43
Razón de carga ambiental (ELR)	0,72	2,31
Índice de sostenibilidad emergética (ESI)	3,30	0,62

Capítulo 3

Como se muestra en la tabla anterior para el caso de la combustión de bagazo la razón de renovabilidad (58,04%) y la razón de eficiencia energética (2,38) demuestra que se explota moderadamente los recursos naturales, el valor de EYR que se encuentra por encima de 2 demuestra que no retroalimenta la economía en términos energéticos. Además, el valor bastante bajo de la razón de carga ambiental del proceso (0,72) manifiesta que presenta un bajo impacto ambiental.

La relación entre el valor de la razón de eficiencia energética (EYR) y el impacto ambiental (ELR) se refleja en el índice de sostenibilidad energética (ESI = 3,30) que muestra que a largo plazo el sistema no es sostenible por sí mismo, debido a que este valor es menor que 5, sin embargo el valor obtenido da una medida que el sistema contribuye moderadamente a la economía.

En cambio la combustión de bagazo-RAC la razón de renovabilidad (30,22%) y la razón de eficiencia energética (1,43) manifiesta que el sistema explota en mucha menor cantidad los recursos naturales, esto se debe a que el costo de recogida y transporte del RAC es mayor al del bagazo. En el caso de la razón de carga ambiental (2,31) demuestra que presenta un mayor impacto al medio ambiente en comparación con la combustión de bagazo solamente, aunque su valor bastante cercano a 2 demuestra que tiene también un bajo impacto ambiental.

En el caso del índice de sostenibilidad energética para la combustión de bagazo-RAC presenta un valor bastante bajo siendo de tan solo ESI = 0,62 lo que demuestra que a largo plazo no es sustentable.

En este estudio solo se tiene en cuenta el bloque de generación para la combustión de las diferentes biomásas, aunque es necesario considerar para un mejor análisis gran parte del sistema no solo la generación sino desde la recepción de la materia prima hasta la producción final.

III.6 Análisis multicriterios de los resultados

La tabla III.26 presenta un resumen para los tres balances desarrollados en el capítulo. La evaluación a partir de estos tres criterios permite evaluar de forma integral el proceso de combustión para estas biomásas.

Tabla III.26 Comparación Multicriterio para el bagazo y bagazo-RAC. Fuente:

Elaboración propia.

Análisis	Combustión de bagazo	Combustión de bagazo-RAC
Energético	$\eta_{\text{directo}} = 78,5 \%$ $\eta_{\text{indirecto}} = 77,67\%$	$\eta_{\text{directo}} = 80,72 \%$ $\eta_{\text{indirecto}} = 79,72 \%$
Exergético	$\eta_{\text{exergética}} = 18,22\%$ $Cp_{vs} = 93,57 \text{ CUC/ton}$	$\eta_{\text{exergética}} = 33,65\%$ $Cp_{vs} = 80,26 \text{ CUC/ton}$
Emergético	$Em (\text{vapor}) = 8,0454E+09 \text{ seJ/g}$ $\%R = 58,04\%$ $EYR = 2,38$ $ELR = 0,72$ $ESI = 3,30$	$Em (\text{vapor}) = 9,2058E+09 \text{ seJ/g}$ $\%R = 30,21\%$ $EYR = 1,43$ $ELR = 2,31$ $ESI = 0,62$

Conclusiones



CONCLUSIONES GENERALES

1. La bibliografía consultada demuestra la importancia de la búsqueda de métodos multicriterios para la evaluación de los potenciales de fuente de energía en Cuba, siendo uno de los más actuales y novedosos la utilización de métodos físicos o energéticos.
2. Se propone una metodología basada en balances energéticos, exergéticos y emergéticos que permita evaluar con base multicriterios la sostenibilidad de la biomasa como fuente de energía.
3. Se valida dicha metodología para dos alternativas (Bagazo y Bagazo-RAC) en una caldera de combustión de tipo RETAL.
4. El balance energético presentó que la eficiencia calculada para el caso del bagazo fue de un 77,67% por el método indirecto y 78,5 % por el directo y para el caso del bagazo-RAC fueron de 79,72 % por el método indirecto y 80,72 % por el directo respectivamente.
5. El balance exergético demostró que la disponibilidad más alta (33,65%), fue para el caso del bagazo-RAC, mientras que para el caso del bagazo la eficiencia exergética o disponibilidad fue de un 18,22%. Este último presenta el mayor costo de producción de vapor (93,57 CUC/ton), por otra parte la combinación de bagazo-RAC presenta menores costos alcanzando 80,26 CUC/ton de costo de producción de vapor.
6. Los parámetros emergéticos de la combustión bagazo-RAC dieron más desfavorables que los de la combustión con bagazo dado que la recogida y transportación del RAC implica un mayor uso de los materiales de la economía.

Recomendaciones



RECOMENDACIONES

1. Evaluar a partir de la metodología propuesta otras fuentes de biomasa existentes en el territorio así como otras tecnologías para su aprovechamiento.
2. Seguir perfeccionando las técnicas basadas en costes físicos para evaluar biomasa como fuente de energía enriqueciéndola con la aplicación de modelos matemáticos.
3. Buscar las vías de disminución de los costes de recogida y transportación de los RAC con vistas a mejorar los indicadores energéticos.

Bibliografía



BIBLIOGRAFÍA

- Manual de los derivados de la caña de azúcar.* (2000). (L. O. G. Taupier Ed. Tercera ed.). La Habana, Cuba.
- APLICACIONES DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA EN LA AGRICULTURA CUBANA. (2018). In M. D. L. A. (MINAG) (Ed.).
- Abreu, C. (2017). *Evaluación emergética del cultivo de caña de azúcar desarrollado en las unidades productivas que tributan a la UEB "14 de Julio"*. (Tesis de grado), UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS, Cienfuegos, Cuba.
- Aguilar, N. (2015). Evaluación Emergy y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, Mexico. *Cultivos Tropicales*, 36, 144-157.
- Álvarez, S., Lomas, P. L., Martín, B. y Montes, C. (2006). *LA SÍNTESIS EMERGÉTICA ("EMERGY SYNTHESIS"). INTEGRANDO ENERGÍA, ECOLOGÍA Y ECONOMÍA.*, Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Arrollo, J. S. y R., W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ciencia y Tecnología*, 16, 20-29.
- Arteaga, L. E., Cabrera, J., Lizet Rodríguez, L. y Casas, Y. (2014). TERMOCONVERSIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA PARA INCREMENTAR LA SOSTENIBILIDAD DE LOS PROCESOS. *Centro Azúcar*, 41, 1-11.
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H. y Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. *Fuel*, 82, 1451-1463.
- Bildirici, M. E. (2013). Economic growth and biomass energy. *Biomass and Bioenergy*, 50, 19-24. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.055>
- Brosowski, A., Thran, D., Mantau, U., Mahro, B., Erdmann, G., Adler, P., Stinner, W., Reinhold, G., Hering, T. y Blanke, C. (2016). A review of biomass potential and current utilisation - Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany. *Biomass and Bioenergy*, 95, 257-272. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.017>
- Brown, M. T. y H., R. A. (1996). Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a

- comparative view. *Ecological Economics*, 19, 219-235.
- Brown, M. T. y. U., S. (1997). Emergy based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology towards environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 9, 51-69.
- Brown, M. T. y. U., S. (2004). Emergy Analysis and Environmental Accounting. In C. Cleveland (Ed.). *Oxford (United Kingdom): Elsevier*, 329-354.
- Bucheli, A. D. (2016). Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio. Nariño, Colombia.
- Cano, N. A. (2012). *Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburra)*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España*.
- Curbelo, J. A. (2017). *Evaluación preliminar del potencial de las diferentes biomásas de la provincia de Cienfuegos*. (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos.
- Dincer, I. y. R., M. (2007). EXERGY. Energy, Environment and Sustainable Development. *United States: Elsevier*.
- Ericsson, K. y. W., S. (2016). The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and Bioenergy*, 94, 57-65. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.011>
- Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P. y Vilarinho, C. (2017). Biomass resources in Portugal: Current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1221-1235. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.140>
- Figueroa, C. R., Montenegro, N. y Paneque, M. (2016). Bioenergy potential from crop residue biomass in Araucania Region of Chile. *Renewable Energy*, 1-20. doi: 10.1016/j.renene.2016.10.013
- Giuntoli, J., Agostini, A., Caserini, S., Lugato, E., Baxter, D. y Marelli, L. (2016). Climate

- change impacts of power generation from residual biomass. *Biomass and Bioenergy*, 89, 146-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.024>
- Gonzalez-Salazar, M. A., Venturini, M., Poganietz, W. R., Finkenrath, M. y Spina, P. R. (2016). Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation. *Biomass and Bioenergy*, 88, 43-58. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.026>
- Guerra, R. (2016). Cartelera de oportunidades de inversión extranjera 2016 - 2017.
- Hernández, A., González, V. M. y Freide, M. L. (2017). APROVECHAMIENTO DE LAS POSIBLES FUENTES DE BIOMASA PARA ENTREGAR MÁS ELECTRICIDAD EN LA FÁBRICA DE AZÚCAR ANTONIO SÁNCHEZ. *Cuba: Centro Azúcar*, 44, 88-97.
- Hernández, B. (2018). Primera Feria Internacional “Energías Renovables Cuba 2018”. In G. A. (AZCUBA) (Ed.).
- Hossen, M., Sazedur, A.H.M., Kabir, A. S., Hasan, F. y Ahmed, S. . (2017). Systematic assessment of the availability and utilization potential of biomass in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 94-105. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.008>
- Izursa, J. L. (2011). Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*, 46(2), 71-76.
- Jiménez, R., López E. J., González F. y Curbelo J. A. (2017). METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA EN CIENFUEGOS CON FINES ENERGÉTICOS. *Revista de Investigaciones*, 10(2).
- Lewandowski, I., Weger, J., van Hooijdonk, A., Havlickova, K., van Dam, J. y Faaij, A. . (2006). The potential biomass for energy production in the Czech Republic. *Biomass and Bioenergy*, 30, 405–421. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.11.020
- Li, Y., Zhou, L. W. y Wang, R.Z. (2017). Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1017-1030. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.214>
- Lobelles, G. O. y L., E. J. (2015). ESTRATEGIA ENERGÉTICA DE AGUADA CON UN ENFOQUE SOCIAL DE LA ENERGÍA, LA TECNOLOGÍA Y LA ECOLOGÍA.

- CIENFUEGOS: *UNIVERSIDAD Y SOCIEDAD*, 7(2), 39-47.
- Loh, S. K. (2016). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*.
- Lomas, P. L. (2009). *Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio*. (Tesis Doctoral), Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Mora, R. A. (2015). Crítica del concepto de exegía. *Ingeniería*, 5(1), 73-82.
- Moring, V. (2006). *Termodinámica* (Vol. 2). La Habana, Cuba: Félix Varela.
- Nakomcic-Smaragdakis, B., Cepic, Z. y Dragutinovic, N. (2016). Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 186-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.118>
- Odum, H. T. (1973). Energy, ecology and economics. *AMBIO*, 6(2), 220-226.
- Odum, H. T. (1996). Environmental Accounting. Energy and Decision Making. *New York: John Wiley*.
- Odum, H. T. (1998). EMERGY EVALUATION. *Environmental Engineering Sciences*, 12.
- Odum, H. T., Brown, M. T., y Brandt Williams, S. (2000). *Handbook of Emergy Evaluation* (Vol. 1-5). Estados Unidos: Universidad de Florida.
- Ozcan, M., Oztürk, S. y Oguz, Y. . (2017). Potential evaluation of biomass-based energy sources for Turkey. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 1-7. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2014.10.003>
- Ozoegwua, C. G., Eze, C., Onwosi, C.O., Mgbemene, C.A. y Ozor, P.A. (2017). Biomass and bioenergy potential of cassava waste in Nigeria: Estimations based partly on rural-level garri processing case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 625-638. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.031>
- Ozturk, M., Saba, N., Altay, V., Iqbal, R., Hakeem, K. R., Jawaid, M. y Ibrahim, F. H. (2017). Biomass and bioenergy: An overview of the development potential in Turkey and Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1285–1302. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.111>
- Phillips, D., Mitchell, E. J. S., Lea-Langton, A. R., Parmar, K. R., Jones, J. M. y Williams,

- A. (2016). The use of conservation biomass feedstocks as potential bioenergy resources in the United Kingdom. *Bioresource Technology*, 212, 271-279. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.057>
- Pinedo, A. U. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Educación a Distancia Facultad de Ciencias.
- Pintó, R. (1991). *Algunos conceptos implícitos en la 1ra y 2da Leyes de la Termodinámica: una aportación al estudio de las dificultades de su aprendizaje*. (Tesis Doctoral), Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Ríos, F. J. (2016). *Análisis termoeconómico de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de biomasa*. (Tesis de Maestría), Libre, Bogotá, Colombia, Bogotá, Colombia.
- Rivera, N. A., Rosas, J. A. y López, R. E. (2015). EVALUACIÓN EMERGY Y LCA EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE VERACRUZ, MÉXICO. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 144-157.
- Rodríguez, A. D., Rosabal, L. B. y Martínez P. B. (2000). *Teoría y Práctica de los Procesos de Combustión*: Editorial Academia
- Saif, Y. y A., A. (2017). An Optimization framework for the climate, land, energy, and water (CLEWS) nexus by a discrete optimization model. *Energy Procedia*, 105, 3232 – 3238. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.714
- Salvador, A. R. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *104(2)*, 331-345.
- Sánchez, V., Gutiérrez, L. F. y Osorio, J. A. . (2006). Análisis emergético del policultivo de cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y bocachico (*Prochilodus sp.*) en la estación Vai, municipio de el Doncello-Caquetá-Colombia. *Momentos de Ciencia*, 3(2), 116-121.
- Sawin, J. (2016). Energías renovables 2016. Reporte de la situación mundial. *París, Francia*.
- SIEN. (2004). *METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS BALANCES DE ENERGÍA*.

- Simangunsong, B. C. H., Sitanggang, V.J., Manurung, E.G.T., Rahmadi, A., Moore, G.A., Aye, L. y Tambunan, A.H. (2017). Potential forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 81, 10-17.
- Stich, J., Ramachandran, S., Hamacher, T. y Stimming, U. (2017). Techno-Economic Estimation of the Power Generation Potential from Biomass Residues in Southeast Asia. *Energy*. doi: 10.1016/j.energy.2017.06.162
- Suzuki, K., Tsuji, N., Shirai, Y., Hassan, M. A. y Osaki, M. (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 97, 149-154. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.023>
- Thomas, P., Soren, N., Rumjit, N. P., James, J. G. y Saravanakumar, M.P. (2017). Biomass resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 718–730. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.053>
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235-244. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>
- Valdés, A. (2017). *Evaluación de la sostenibilidad de la producción de azúcar crudo mediante el análisis emergético. Caso de estudio: UEB Fábrica de Azúcar “14 de Julio”*. (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos, Cuba.
- van Hal, A. (2017). *Estudio de viabilidad económica y técnica de la instalación de una planta fotovoltaica en la Ciudad Deportiva de Lanzarote*. (Tesis de Grado), Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM).
- Vavrova, K., Knapek, J., Weger, J., Kralík, T. y Beranovský, J. (2017). Model for evaluation of locally available biomass competitiveness for decentralized space heating in villages and small towns. *Renewable Energy*, 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.079>
- Vizcón, R. (1997). *Determinación de coeficientes y recomendaciones para el diseño del sobrecalentador de vapor convectivo en calderas bagaceras*. (Tesis Doctoral), Universidad de Matanzas, Cuba.

Anexos



ANEXOS

Anexo 1: Entalpía específica de los productos de la combustión y del aire; [kJN/m3].

Fuente: Rodríguez 2000.

ϑ [°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

Anexos

Anexo 2: Entalpía específica de la ceniza de los combustibles sólidos; [kJ/kg]. Fuente: Rodríguez 2000.

ϑ ; [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$(c\vartheta)_{cen}$	81	170	264	361	460	562	664	769	878	987
ϑ ; [°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: Bagazo producido y utilizado como combustible en toneladas en tres de las últimas zafras. Fuente: Curbelo 2017.

Zafras	Bagazo producido (t)	Bagazo combustible (t)	Bagazo sobrante (t)
2013 – 2014	508 347	487 303	21 044
2014 – 2015	449 356	430 735	18 621
2015 - 2016	613 897	588 409	25 488
Total	1 571 600	1 506 447	65 153

Anexo 4: Paja en los Centros de Limpieza en las tres últimas zafras. Fuente: Curbelo 2017.

Cosechas	Pajas en centros de limpieza (t)
2013 – 2014	80 264.40
2014 – 2015	82 849.70
2015 - 2016	87 345.75
Total	250 460.86

Anexo 5: Procesamiento de la caña de azúcar.



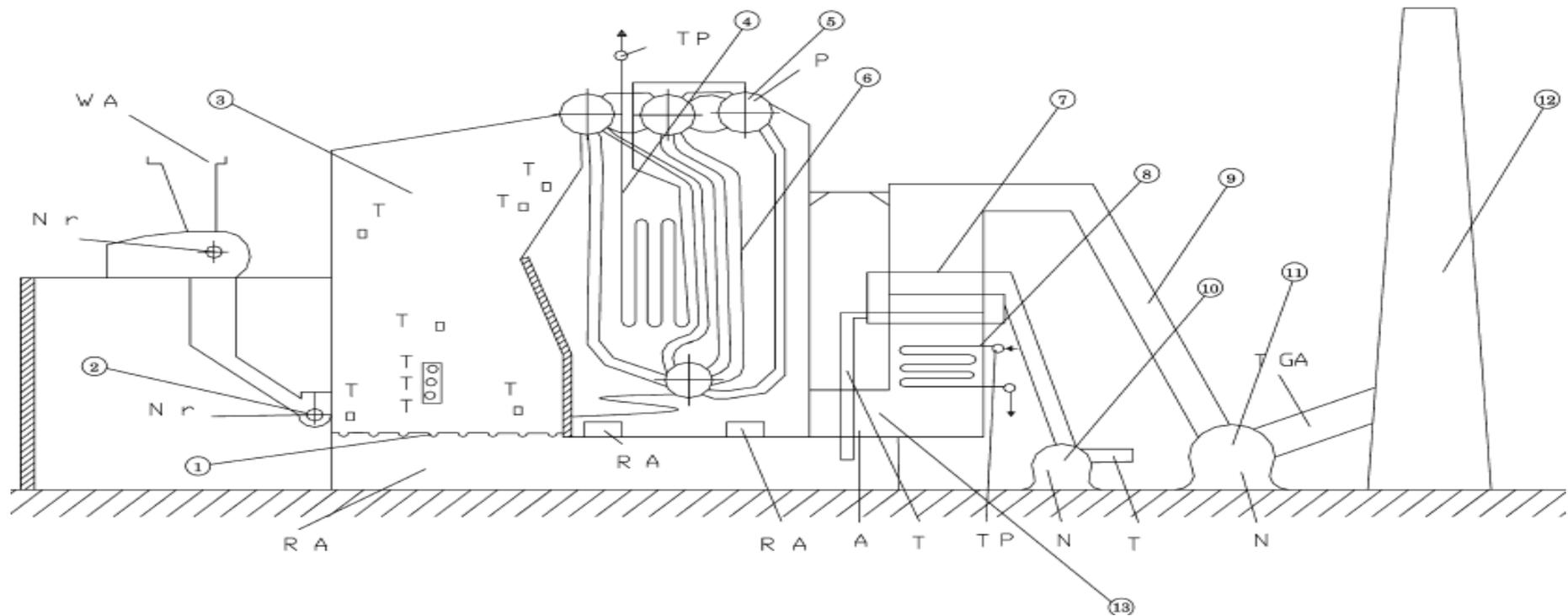
Anexos

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



Anexos

Anexo 7: Boceto de una caldera de bagazo RETAL que muestra las principales superficies térmicas (números) y la ubicación de los puntos de medición: (1) parrilla del horno, (2) esparcidor de estufa, (3) horno, (4) sobrecalentador, (5) tambores, (6) generando tubos, (7) calentador de aire, (8) economizador, (9) conducto de gases de escape, (10) ventilador de suministro de aire, (11) ventilador de extracción de aire, (12) chimenea y (13) la tolva de cenizas en el U vuelta del conducto de gases de escape. Las letras se refieren a los parámetros medidos; UN; concentración de cenizas; GA, análisis de la composición del gas de escape; NORTE; fuerza de motor; PAG; presión; r; revoluciones por minuto; R; peso residual; T; temperatura y W; porcentaje de humedad del bagazo.



Anexo 8: Símbolos más comunes para la construcción de diagramas energéticos.

Fuente: Valdés 2017.

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

Anexo 9: Las reglas del algebra emergética resumidas. Fuente: Valdés 2017.

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