

**Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael  
Rodríguez”**

**Facultad de Ingeniería  
Departamento de Química**



# **Trabajo de diploma**

**Título: Análisis técnico económico de la mesa  
alimentadora de bagazo para incrementar la  
generación de energía en la UEB “Ciudad  
Caracas”, Cienfuegos.**

**Autor:** Carlos Jesús Monzón Díaz

**Tutores:** Ing. Eliané Arias Molina

**Colaboradores:** Ing. José Jaime Franco

Ing. Danny Abreu Fernández

**Curso 2020-2021**

## PENSAMIENTO

*No se necesita un químico que haya aprendido esta ciencia tan solo leyendo libros, sino uno que lo haya comprendido por ejercitarse con dedicación en este arte...*

*Anónimo*

## DEDICATORIA

*Especialmente a mi abuelito que Dios lo tenga en su gloria y a las dos mujeres más especiales de mi vida, mi mamá y mi tía, sin ustedes este momento nunca hubiese llegado, muchas gracias por no perder la esperanza.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi tutora por todo ese apoyo que me brindó y su dedicación por un fin beneficioso.*

*A todo el claustro de profesores que me impartieron clases en estos 5 largos años.*

*A mis queridos compañeros de clases; Pilar; la chupi, brunon, la súper, a mi querido teen del asco y a todos los que no mencioné.*

*A toda mi familia que me apoyó incondicionalmente para que este sueño se cumpliera.*

*A todos, sin que me falte nadie, muchísimas gracias.*

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el estudio de la importancia del uso de fuentes alternativas de energía recalcando la biomasa cañera, en este caso el bagazo como principal materia prima en la combustión de las calderas de la UEB “Ciudad Caracas”. Se elaboró una metodología que permitió el análisis de los parámetros energéticos y del comportamiento energético en términos de consumo y generación de la zafra 2020-2021 con respecto a las zafas anteriores (2018-2019 y 2019-2020) destacando a la zafra 2020-2021 como significativa por la entrega de energía eléctrica al sistema nacional. Se realizó un estudio técnico-económico de la mesa alimentadora de bagazo del central, determinando el efecto económico de la venta de energía eléctrica al Sistema Electro-Energético Nacional (SEN), sin tomar en cuenta en este análisis, los ingresos por el azúcar y el alimento animal vendidos, donde se concluyó que para el central de 153,46 t/hora de molida potencial para una zafra de 120 días y bajo condiciones normales de funcionamiento se pueden obtener ingresos por la venta de energía eléctrica al SEN, ascendente a 10 749 771,50 CUP y un efecto económico total (consumo propio más venta) equivalente a 35 837 435,0286 CUP, lo cual se traduce en beneficios financieros para la fábrica. Se destacó que el uso de la biomasa (bagazo) como fuente de energía en la industria azucarera es muy atractiva desde el punto de vista medioambiental, no solamente como reemplazo de los combustibles fósiles, sino también como mejora de los problemas de emisión de gases contaminantes al medio ambiente; y a partir de estas consideraciones se insta los beneficios de instalación de la mesa alimentadora de bagazo en la UEB que abastece de un flujo constante de bagazo a las calderas.

## ABSTRACT

In the present work the study of the importance of the use of alternative energy sources is carried out, emphasizing the sugarcane biomass, in this case bagasse as the main raw material in the combustion of the boilers of the UEB "Ciudad Caracas". A methodology was developed that allowed the analysis of energy parameters and energy behavior in terms of consumption and generation of the 2020-2021 harvest with respect to the previous harvests (2018-2019 and 2019-2020), highlighting the 2020-2021 harvest. As significant due to the delivery of electrical energy to the national system. A technical-economic study was carried out of the bagasse feeder table of the plant, determining the economic effect of the sale of electrical energy to the National Electro-Energy System (SEN), without taking into account in this analysis, the income from sugar and the animal feed sold, where it was concluded that for the plant of 153.46 t / hour of potential ground for a harvest of 120 days and under normal operating conditions, income can be obtained from the sale of electricity to the SEN, amounting to 10 749 771.50 CUP and a total economic effect (own consumption plus sales) equivalent to 35 837 435.0286 CUP, which translates into financial benefits for the factory. It was highlighted that the use of biomass (bagasse) as a source of energy in the sugar industry is very attractive from an environmental point of view, not only as a replacement for fossil fuels, but also as an improvement in the problems of polluting gas emissions to the environment; Based on these considerations, the benefits of installing the bagasse feeder table are established in the UEB, which supplies a constant flow of bagasse to the boilers.

# Índice

|                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción .....</b>                                                                                                | <b>8</b>  |
| <b>Capítulo 1 Revisión bibliográfica. ....</b>                                                                           | <b>10</b> |
| 1.1. Sistemas de cogeneración. ....                                                                                      | 10        |
| 1.1.1 Definición del nivel de cogeneración. ....                                                                         | 12        |
| 1.1.2 Algunos índices usados en centrales azucareros. ....                                                               | 12        |
| 1.1.3 Ventajas y beneficios de la cogeneración .....                                                                     | 15        |
| 1.2. Utilización de biomasas en el marco internacional.....                                                              | 16        |
| 1.3. Disponibilidad de la biomasa como fuente de energía. ....                                                           | 19        |
| 1.3.1 La biomasa como fuente de cogeneración energética. ....                                                            | 21        |
| 1.4. Utilización de biomasas en Cuba en la generación de energía eléctrica.....                                          | 22        |
| 1.5. Utilización del bagazo de caña de azúcar como combustible esencial en la<br>cogeneración de energía eléctrica. .... | 27        |
| 1.5.1 Caracterización del bagazo como combustible. ....                                                                  | 27        |
| 1.5.2 Composición física del bagazo.....                                                                                 | 28        |
| 1.5.3 Composición química del bagazo. ....                                                                               | 29        |
| 1.5.4 Calor específico de combustión del bagazo .....                                                                    | 29        |
| 1.5.5 Contenido de humedad. ....                                                                                         | 30        |
| 1.5.6 Contenido de cenizas.....                                                                                          | 30        |
| 1.6. Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera. ....                                        | 30        |
| 1.7. Conclusiones parciales.....                                                                                         | 31        |
| <b>Capítulo 2 Metodología de desarrollo.....</b>                                                                         | <b>32</b> |
| 2.1. Caracterización de la UEB “Ciudad Caracas”. ....                                                                    | 32        |
| 2.1.1 Breve descripción de proceso productivo en un central azucarero. ....                                              | 32        |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2. Metodología de desarrollo de la investigación. ....                                                       | 34        |
| 2.2.1 Descripción de las instalaciones tecnológicas del área de generación en la<br>UEB “Ciudad Caracas”. .... | 37        |
| 2.2.2 Análisis energético en el área de generación de energía. ....                                            | 40        |
| 2.2.3 Balances de Energía ....                                                                                 | 40        |
| 2.2.4 Resultados obtenidos ....                                                                                | 42        |
| 2.2.5 Comportamiento de parámetros energéticos. ....                                                           | 43        |
| 2.3. Conclusiones parciales. ....                                                                              | 45        |
| <b>Capítulo 3 Análisis del impacto económico y medioambiental. ....</b>                                        | <b>46</b> |
| 3.1 Análisis económico ....                                                                                    | 46        |
| 3.2 Análisis del beneficio medioambiental. ....                                                                | 53        |
| 3.3. Conclusiones parciales. ....                                                                              | 56        |
| <b>Conclusiones .....</b>                                                                                      | <b>57</b> |
| <b>Recomendaciones .....</b>                                                                                   | <b>58</b> |
| <b>Referencias Bibliográficas.....</b>                                                                         | <b>59</b> |
| <b>Anexos.....</b>                                                                                             | <b>61</b> |

## Introducción

El actual y futuro escenario económico mundial se proyecta sobre un sostenido aumento del precio del petróleo y la fuerte dependencia de la economía mundial de este producto crea condiciones para la búsqueda de alternativas basadas en fuentes renovables y no contaminantes. Así, la caña de azúcar ocupa un lugar destacado para el desarrollo de la bioenergía en busca de la sostenibilidad y la protección del medio ambiente, La industria azucarera constituyó históricamente el sector principal de la economía cubana debido a su peso decisivo en la dinámica reproductiva del país(Anoceto, 2017). Este liderazgo lo ocupó de forma incompartida hasta mediados de los años ochenta, en que se decidió desarrollar intensivamente el turismo y propiciar el fomento de las ramas farmacéutica y biotecnológica. A partir del año 2002 se inició un proceso de reordenamiento y redimensionamiento del sector con el objetivo de alcanzar mejores resultados desde el punto de vista tecnológico, económico y ambiental, con gran interés en fortalecer el desarrollo de los derivados, la introducción de mejoras tecnológicas y la explotación al máximo de todos los beneficios con que cuenta esta industria. La diversificación de la Industria Azucarera planteada por Cuba, aprovecha el potencial que ofrece la disponibilidad de biomasa cañera y el desarrollo de las tecnologías de cogeneración(González, 2015).

En los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021 se plantea el empleo de las fuentes renovables de energía, incitando a acelerar el cumplimiento del Programa aprobado hasta 2030 para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía.(Rodriguez, 2010)

El bagazo de la caña de azúcar constituye uno de los principales recursos cuyo aprovechamiento integral y eficiente ofrece nuevas perspectivas para el desarrollo del país, este constituye la principal fuente de biomasa, aunque también existen otras fuentes representadas por recursos forestales; brinda potencialidades a la industria azucarera ya que se ha utilizado en procesos de

cogeneración energética, en la producción de papel, en la producción de bioetanol y otros, con buenos resultados económicos. (Quintana, 1998)

En la UEB Central “Ciudad Caracas” perteneciente a la provincia Cienfuegos, Cuba, es posible aumentar la generación de energía eléctrica de forma segura y estable, empleando la biomasa que brinda la agroindustria azucarera (bagazo) como fuente de energía renovable mediante la instalación de una tecnología apropiada.

En correspondencia con lo anterior y con el fin de proponer mejoras tecnológicas que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos, se propone el siguiente problema de investigación. (Hernández, 2018)

**Problema científico:**

No se han realizado estudios previos técnico-económicos de la mesa alimentadora de bagazo en la UEB “Ciudad Caracas” que permitan establecer los beneficios de su implementación para incrementar la generación de energía.

**Hipótesis:**

Si se realiza un estudio técnico-económico de la mesa alimentadora de bagazo de la UEB “Ciudad Caracas”, es posible establecer los beneficios de su implementación para incrementar la generación de energía.

**Objetivo general:**

Realizar un análisis técnico-económico de la mesa alimentadora de bagazo para incrementar la generación de energía en la UEB “Ciudad Caracas”.

**Objetivos específicos:**

1. Establecer los fundamentos teóricos-conceptuales esenciales sobre el aprovechamiento del bagazo de caña como fuente de energía.
2. Desarrollar una metodología para el análisis técnico-económico de la mesa alimentadora de bagazo en la UEB “Ciudad Caracas”.
3. Realizar un análisis técnico-económico y medioambiental de la implementación de la mesa alimentadora de bagazo en la UEB “Ciudad Caracas”

## **Capítulo 1 Revisión bibliográfica.**

En las últimas décadas, los países desarrollados y la comunidad internacional en general han tomado conciencia de los grandes problemas que aquejan al mundo y de la necesidad de ir hacia un desarrollo sostenible. Uno de los grandes problemas que debe ser resuelto es la disminución del consumo de combustibles fósiles, debido al agotamiento inevitable de las reservas por los altos niveles de consumo, y por la necesidad de reducir las emisiones de los gases contaminantes y de efecto invernadero que afectan a la atmósfera y al medio ambiente en general. Por este motivo en los últimos años se han estado buscando nuevas fuentes de energía, renovables y limpias, que ayuden a reducir el consumo de aquellos y la consiguiente emisión de gases de contaminantes.

Entre las fuentes renovables de energía en estudio, la más antigua, utilizada y difundida, es la energía obtenida a partir de la biomasa (Abstengo, 2018, Gutiérrez, 2017).

La biomasa más utilizada como fuente de energía en Cuba es el bagazo de caña, este es utilizado en los centrales azucareros como combustible, y mediante los sistemas de cogeneración es aprovechado aún más el calor que este desprende al ser quemado en los generadores de vapor de los centrales azucareros.

El uso y estado de la tecnología utilizada en los centrales azucareros, supone una marcada importancia para el desarrollo de esta industria, y en consecuente la propia economía. Las variadas aplicaciones que tienen actualmente las calderas industriales, y sus condiciones de trabajo, han de responder al orden técnico y parámetros establecidos para un adecuado control de calidad en sus producciones. La búsqueda de soluciones para rescatar o sustituir este tipo de tecnología, no solo mejora su eficiencia y eficacia, sino que perfecciona el resultado esperado en el orden administrativo (González, 2015).

### **1.1. Sistemas de cogeneración.**

De forma general los sistemas de cogeneración son instalaciones auxiliares que ayudan a ahorrar energía y costos energéticos mientras estén funcionando y

no causen ningún perjuicio cuando por cualquiera razón no estén en funcionamiento.

Para implementar esta estación de energía es necesario:

- Asegurar una capacidad mínima de energía eléctrica (según la máxima térmica) en caso de fallo de suministro de otras fuentes.
- Posibilitar la compensación de la energía reactiva de la industria, ahorrando el costo de la energía eléctrica por este concepto.

Es evidente el primer punto, ya que una instalación de cogeneración bien concebida, producirá cada KWh a un costo similar al de la energía del combustible, si el calor de los gases de combustión se aprovecha en su totalidad. Sobre todo si el combustible utilizado es bagazo (Rodriguez, 2010)

Los sistemas de cogeneración se pueden agrupar de la forma siguiente:

- Motor de combustión interna.
- Turbinas de gas.
- Turbinas de vapor.
- Ciclos combinados.

Aún cuando la cogeneración debe ser evaluada como parte de un plan de administración de energía, su principal prerequisite es que la planta presente una demanda significativa y concurrente de calor y energía eléctrica, una vez identificado este escenario pueden explorarse sistemas de cogeneración aplicables bajo las siguientes circunstancias:

- Desarrollo de nuevas instalaciones.
- Ampliaciones importantes a instalaciones existentes con incremento de demandas de calor y/o de producción de energía remanente de proceso.
- Reemplazo de equipos viejos de proceso o de generación de energía eléctrica y oportunidad de mejorar la eficiencia del sistema de suministro de energía (Polanco, 2019)

### **1.1.1 Definición del nivel de cogeneración.**

En el escenario actual, dada la problemática del sector eléctrico, los beneficios de los sistemas de cogeneración no solo se manifiestan hacia el usuario directo en un menor costo energético, sino también en la posibilidad de la venta de excedentes eléctricos a la red pública. Aunque en general la mayoría de los empresarios muestren interés por satisfacer sus necesidades de energía de proceso, existe la alternativa de convertirse además en productor de electricidad, que puede resultar muy atractiva, atendiendo inicialmente a la satisfacción total de sus necesidades térmicas y, en función de esto, ampliar su capacidad de generación eléctrica (Faife, 2018).

Existen entonces dos niveles de cogeneración por tratar:

- Satisfacción térmica al 100% y compra de electricidad.
- Este es incapaz de generar toda la electricidad requerida en ocasiones, debido a fuertes variaciones en la relación calor/energía (Q/E) causadas por la variación de la demanda eléctrica. La flexibilidad que se requiere complicaría considerablemente el sistema y, dada la duración de los picos de demanda eléctrica, no se justifica la inversión en incrementar así su capacidad eléctrica.
- Satisfacción térmica al 100 % con excedentes eléctricos.
- En el caso anterior, el aumento de la capacidad de generación eléctrica, en caso de que resulte técnica y económicamente viable, como es el caso de varias instalaciones actuales, daría como resultado poder exportar electricidad a la red pública por largos períodos.

### **1.1.2 Algunos índices usados en centrales azucareros.**

La cogeneración en la industria azucarera, surgió como una cuestión necesaria en el desarrollo de la ingeniería, se hizo evidente que existe una reserva grande de producción de energía mecánica o sea, existe una demanda alta de energía térmica y una relativamente pequeña demanda de energía mecánica, del orden del 10 % de la primera.

Los sistemas de cogeneración serán seleccionados de acuerdo al análisis energético, atendiendo a las características del esquema de cogeneración. Un

sistema de cogeneración es tanto más eficiente cuanto mayor sea la cantidad de calor aprovechado, por lo que el dimensionamiento óptimo del mismo deberá estar basado en la premisa de satisfacer al 100 % de la energía térmica que el proceso demanda (Alcalde, 2017).

Algunos de los índices utilizados en los centrales azucareros para diferentes áreas del proceso se exponen a continuación:

- Generación de vapor (Calderas).

La relación:

$$\eta_{cal} = G_{cal} \frac{Q_n}{Kg_{bag quem/tc}} * 100 \quad (1.1)$$

$\eta_{cal}$ : eficiencia de la caldera

$Q_n$ : calor neto

Se llama eficiencia de la caldera.

En Cuba se considera que la eficiencia total nunca excede del 61,3% y solo llega a este valor en las instalaciones mejores. (Herrera, 2017).

En general, la cantidad de vapor producido por unidad de peso del bagazo varía entre 1,80 a 2,75 kg/kg de bagazo. Frecuentemente se encuentran: 2,25 a 2,50 kg/kg (Herrera, 2017).

- Generación eléctrica (Turbogeneradores).

El tamaño de la planta eléctrica depende de:

- La disponibilidad de combustible que se tiene para producir vapor.
- La presión y temperatura del vapor a la entrada del turbo generador.
- El esquema de cogeneración. Los factores anteriores determinan la potencia eléctrica generada ya sea, utilizando turbogeneradores de contrapresión o condensación con extracciones.

Todo esto garantizando que, por medio de los turbos se conduzca el vapor necesario para satisfacer la demanda de calor al proceso de fábrica y se produzca trabajo útil en el los bornes del generador eléctrico de la turbina. Los steam rate (SR) de las turbinas que actualmente operan en los ingenios modernos, oscilan entre 5,49 – 10,88 kg vapor / kWh (Anoceto, 2017).

En general la generación de la energía eléctrica por tonelada de caña procesada hasta el momento se encuentra en los siguientes valores en la tabla 1.1 a nivel mundial (Gutiérrez, 2017).

Tabla 1.1: Generación de energía eléctrica por tonelada de caña.

|             |                  |
|-------------|------------------|
| LOUSIANA    | 90 kWh/ tch      |
| FLORIDA     | 22 kWh/ tch      |
| PUERTO RICO | 26 - 28 kWh/ tch |
| CUBA        | 26 - 30 kWh/ tch |

Fuente: (Gutiérrez, 2017).

El coeficiente de evaporación de un tacho es el peso del agua evaporada de la masa cocida, por unidad de superficie de calentamiento en la unidad del tiempo. Se expresa generalmente como  $\text{kg/m}^2/\text{h}$  (Trujillo, 2020).

La baja eficiencia de los sistemas de cogeneración actuales, así como el no aprovechamiento de corrientes con calidad térmica en el proceso productivo, aumenta el consumo de vapor, provoca también un aumento en el consumo de bagazo, y se limita de esta manera la producción de electricidad y los excedentes de bagazo. Con la aplicación de herramientas de simulación e integración de procesos y un análisis energético y exergético de diferentes esquemas de cogeneración, es posible determinar los esquemas más eficientes con mayores ganancias, en cuanto a la producción de electricidad y excedentes de bagazo (Rodríguez, 2014a).

Para llegar a conocer las condiciones actuales de los esquemas energéticos de las fábricas de azúcar es necesaria la aplicación de un balance termoenergético, porque puede reflejar las dificultades existentes y conducir a la búsqueda de soluciones para evitar excesos en el consumo de combustible. La utilización de la modelación matemática para predecir el comportamiento de procesos industriales es en nuestros días una herramienta común de trabajo en la ingeniería moderna. La industria azucarera, al ser un tipo de industria mayormente característica del tercer mundo, no ha recibido de ningún modo este beneficio, existen solo aplicaciones aisladas que total o parcialmente han tratado de paliar

esta carencia. En Cuba, estos esfuerzos, dieron origen a diversos paquetes, softwares, que basan la realización de los balances de masa en los cálculos de diseño de estos equipos por lo que se acercan o se alejan en menor o mayor medida a la metodología de Espinosa Pedraja (González, 2015).

El simulador Sistema Termo Azúcar (STA) en su versión 4.0 se ha concebido con el objetivo de realizar la evaluación de los sistemas termo-energéticos en fábricas de azúcar crudo. Es un programa de simulación del tipo modular para estado estacionario, cumpliendo con las principales características y ventajas de este tipo de simuladores, entre las que se destacan, la gran flexibilidad para representar integralmente los distintos esquemas e incorporar nuevos módulos y la gran cantidad de información sobre las corrientes y los equipos. Así como la posibilidad de realizar múltiples análisis sobre los resultados de la simulación (Herrera, 2017).

### **1.1.3 Ventajas y beneficios de la cogeneración**

La cogeneración es la producción simultánea de calor útil y electricidad cerca de los puntos de consumo. Es por tanto un sistema que aprovecha la energía de combustible primario de un modo sustancialmente más eficiente que las tecnologías de producción separadas, como son las centrales de producción de calor (Rodríguez, 2014a).

Ventajas de la cogeneración:

- Se aprovechan varios tipos de energía, por lo que tiene un potencial de rendimiento mayor que una central convencional.
- Menor dependencia de los combustibles.
- Menor costo de producción. Menor impacto ambiental.
- Se produce la energía donde se consume, por lo que aumenta la autonomía de la fábrica.
- Beneficios de la cogeneración:

- Reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad, así como de otros contaminantes que son dañinos para la salud del ser humano y del medio ambiente.
- Menor consumo de agua comparado con la operación de una planta convencional.
- Aumenta la seguridad energética nacional, especialmente si se utilizan, de forma sustentable, fuentes renovables como los residuos forestales de la biomasa.
- Contribuyen a mejorar la competitividad de una empresa o negocio, como resultado de la reducción de costos en la factura eléctrica y/o por el consumo de combustibles. Generación de empleos calificados.
- Al tratarse de esquemas de generación distribuida, la cogeneración permite la reducción de pérdidas asociadas a la red de transmisión y distribución.
- Permiten posponer o sustituir la nueva capacidad de generación, así como la reducción de la inversión para ampliar la red nacional de transmisión en redes y subestaciones.
- Reduce los problemas de congestión en las redes de transmisión.
- Contribuyen a la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, brindando control de voltaje, capacidad de reserva durante contingencias y capacidad de arranque en frío.

### **1.2. Utilización de biomásas en el marco internacional.**

Hoy en día, la biomasa representa, tras el carbón, el petróleo y el gas natural, la cuarta fuente energética en importancia, siendo su aporte a la energía primaria mundial consumida del 15 %. El desarrollo en estos últimos años de tecnologías aplicadas a este campo ha permitido una utilización muy eficiente de la materia prima y ha ampliado sus ámbitos de aplicación a la generación de energías de mayor calidad que la simple producción térmica, tales como son los combustibles líquidos destinados al transporte y la electricidad. Todo ello ha

contribuido a mejorar la competitividad de este recurso renovable frente a los productos fósiles y a aumentar su potencial energético, el cual se cifra en estos momentos en unas cinco a seis veces el consumo mundial de energía primaria.(Gutiérrez, 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 incluyendo una disminución en los usos de los combustibles fósiles a nivel mundial y un aumento significativo de los sistemas de acumulación de energía (Gutiérrez, 2017).

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.

Durante el 2015, en nuestro país 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 GW/tcm; 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.(Rios, 2017).

El desarrollo y operación de los actuales sistemas de producción y consumo necesitan grandes cantidades de energía para mantenerse. Por ello, en nuestra sociedad, los países pobres tienen un bajo consumo de energía, mientras que el consumo energético de los países ricos es varias veces superior a los anteriores, aun cuando sus procesos sean mucho más eficientes y existan importantes

campañas de concienciación para el ahorro energético. Esto significa que el desarrollo de un país implica un aumento considerable de su consumo energético. Esta situación se puede constatar en la medida que se analiza el aumento del consumo energético referenciado a los países en vías de desarrollo.

La Agencia Internacional de la Energía ha desarrollado diversos proyectos sobre biomasa a través de su división IEA Bioenergy. Esta agencia calcula que el 10% de la energía primaria mundial procede de los recursos asociados a esta fuente, incluidos los relacionados con biocombustibles líquidos y biogás. Gran parte de ese porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo, donde resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía, justo en aquellos países donde se prevé un mayor aumento de la demanda energética. (Hernández, 2018)

Según datos del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “algunos países pobres obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles”. En África, Asia y Latinoamérica representa la tercera parte del consumo energético y para 2.000 millones de personas es la principal fuente de energía en el ámbito doméstico. Pero, en muchas ocasiones, esta utilización masiva no se realiza mediante un uso racional y sostenible de los recursos, sino como una búsqueda desesperada de energía que provoca la deforestación de grandes áreas, dejando indefenso al suelo frente a la erosión. La propia FAO reconoce que “la mejora del uso eficiente de los recursos de la energía de la biomasa - incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de materiales energéticos - ofrece oportunidades de empleo, beneficios ambientales y una mejor infraestructura rural”. Incluso va más allá al considerar que el uso eficiente de estas fuentes de energía ayudarían a alcanzar dos de los objetivos de desarrollo del milenio: “erradicar la pobreza y el hambre y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”. Volviendo al principio, la biomasa podría ser el vector energético que permitiera el desarrollo de los países pobres, evitando que el aumento del consumo energético asociado a este desarrollo pusiera en peligro el medio ambiente y la seguridad de abastecimiento energético de nuestra sociedad. Mientras esta apuesta se hace realidad, las previsiones concretas de

futuro las marca, entre otros, el Panel intergubernamental sobre Cambio Climático, estableciendo que antes de 2100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debe estar entre el 25 y el 46%.

La definición de biomasa que se utiliza en las directivas de la Unión Europea (UE) es la siguiente:

Biomasa es la fracción biodegradable de productos, deshechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales (González, 2015).

### **1.3. 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.

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.

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 (Hernández, 2018).

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.

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 (Gutiérrez, 2017).

En cuanto a los beneficios de la utilización energética de la biomasa se pueden mencionar:

- 1 Renovabilidad: Siempre que exista un manejo adecuado de los recursos involucrados, se puede afirmar que la biomasa es fuente renovable de energía.
- 2 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.

3 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.

### **1.3.1 La biomasa como fuente de cogeneración energética.**

En el sistema de generación de vapor (Abstengo, 2018), cuando denominamos la energía total, se trata de producir potencia y de ella generar trabajo mecánico, debe pensarse en la cogeneración. El término cogeneración indica la producción simultánea de electricidad y calor (vapor) útiles a un proceso.

La cogeneración de energía eléctrica, a partir de la quema del bagazo (residuos de la molida), se encuentra entre una de las ventajas más importantes que posee la agroindustria de la caña de azúcar, ante la crisis energética y la necesidad de cambiar la matriz energética cubana. Esta cogeneración proporciona beneficios económicos importantes, tales como la reducción de los costos de producción del azúcar, el etanol, hace autosostenible el proceso industrial y permite crear excedentes que pueden ser vendidos a la red nacional eléctrica.

Además, se reduce o elimina la dependencia a los combustibles fósiles; se descentraliza la fuente de generación y se localiza de forma territorial, lo cual contribuye al ahorro de costos y gastos de transportación en el suministro de combustible fósil y a la reducción de pérdidas en la transmisión y distribución, por ese carácter territorial de la fuente de suministro. A esto se le añaden beneficios sociales, como la generación de empleos, la garantía del suministro de electricidad a las comunidades cercanas, y el sustentamiento y la promoción de otras actividades industriales y de servicios territoriales. La cogeneración de energía eléctrica, a partir de la quema del bagazo, también conlleva beneficios ambientales como las bajas emisiones de CO<sub>2</sub>, comparadas con los combustibles fósiles, lo cual resulta compensado finalmente con des-emisión a partir del efecto bosque de las plantaciones de caña de azúcar (Rubio, 2018). El costo de capital de la instalación de los proyectos de cogeneración basados en el bagazo está en el rango de 4,5 a 5,0 millones/MW dependiendo de los parámetros técnicos, financieros y operativos. La viabilidad económica para la capacidad inferior a 6 MW no es sostenible. El tipo adecuado de capacidad desde el punto de vista de la viabilidad económica debe estar entre 7,5 y 10 MW (Rodriguez, 2014b). El tamaño del proyecto depende de la disponibilidad de combustible (biomasa) cerca de la ubicación del proyecto. La recolección y almacenamiento de biomasa es la actividad crítica para que cualquier proyecto de biomasa tenga éxito.

#### **1.4. Utilización de biomasa en Cuba en la generación de energía eléctrica.**

En Cuba 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/m<sup>3</sup>, con un crecimiento de hasta 7 m de altura y alta dureza y solidez, con un período de servicio de 50 años. Además, el marabú es un excelente combustible debido a su bajo contenido de humedad (22% de humedad de almacenaje, en el

extremo inferior del rango para una astilla secada al aire) y se estima que 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 101MW (Rodríguez, 2010).

Para poder explotar los recursos de la biomasa es necesario según (Alcalde, 2017).

- 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 actualidad, en muchos países productores de azúcar a base de caña, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible. Recientemente, en Cuba, se ha aprobado un programa nacional para el incremento de la generación de electricidad a base de biomasa cañera. Este programa es parte de una estrategia nacional para el incremento de la participación de las fuentes renovables de energía en la matriz de generación de electricidad. El programa presenta un horizonte temporal hasta el 2030 y pretende que ese año se alcance un 14 % de generación de electricidad con biomasa cañera. El programa, permitirá a la industria azucarera cubana alcanzar una potencia para generación de electricidad de 1 070 MW (Anoceto, 2017)

El gobierno cubano en junio del 2014 aprobó la “Política para el Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía para el Periodo 2014-2030”. La política tiene como objetivos:

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

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

El incremento de la utilización de las fuentes renovables de energías constituye un lineamiento de la política energética de Cuba. De esta manera se desarrollan programas para la construcción de centrales hidroeléctricas, la instalación de celdas y paneles fotovoltaicos, sistemas termo solares, y la utilización de otras fuentes como la eólica y la biomasa (Polanco, 2019).

La biomasa cañera es el portador energético renovable cuyo uso está más difundido en Cuba. En la Isla la potencia instalada hasta el 2010 para la cogeneración de energía eléctrica y térmica en la industria azucarera asciende a los 528 MW. El biogás es un recurso bioenergético renovable que se puede usar para producir electricidad, como gas de refrigeración, para la iluminación, la cocción de alimentos y el funcionamiento de los motores de combustión interna en los medios de transportes automotor, en el país se han identificado potencialidades para utilizar dicho componente en la cogeneración de energía eléctrica y térmica a partir de residuos de la industria azucarera y del café, entre otras (Faife, 2018).

La potencia de biogás del país permitiría instalar una potencia de generación eléctrica de 85 MW y producir alrededor de 700 GWh al año. Así se evitaría emitir más de tres millones de toneladas de dióxido de carbono y se ahorrarían unas 190 mil toneladas de petróleo, además se obtendrían cerca de 2 millones de toneladas de abono orgánico y se reduciría significativamente la carga contaminante (Hernández, 2018)

En la Tabla 1.2 se representan las biomاسas empleadas como combustible en Cuba (no incluye el sector privado) del año 2013 al 2018.

Tabla 1.2 Biomosas empleadas como combustible en Cuba.

| <b>Concepto Biomasa</b>                 | <b>UM</b>       | <b>2013</b> | <b>2014</b> | <b>2015</b> | <b>2016</b> | <b>2017</b> | <b>2018</b> |
|-----------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Bagazo de caña <sup>(d)</sup>           | Mt              | 4138,1      | 5152,2      | 5386,5      | 3922,0      | 5051,4      | 6026,4      |
| Leña                                    | Mm <sup>3</sup> | 1383,8      | 1196,6      | 1079,2      | 1106,8      | 1053,4      | 962,2       |
| Serrín de madera                        | Mt              | 3,7         | 4,4         | 2,2         | 0,4         | 1,3         | 0,1         |
| Cáscara de arroz                        | Mt              | 16,5        | 4,3         | 4,3         | 13,6        | 2,7         | -           |
| Desechos de café                        | Mt              | 0,5         | 3,6         | 2,5         | 1,2         | 1,4         | -           |
| Otros desechos forestales               | Mt              | 7,5         | 12,9        | 6,4         | 1,2         | 5,4         | 0,8         |
| Otros desechos agrícolas <sup>(e)</sup> | Mt              | 1,1         | 2,6         | 2,6         | 1,4         | 1,7         | -           |

Fuente: (Polanco, 2019).

Como se puede observar de las biomosas presentadas en la Tabla 1.2 el bagazo de caña constituye la biomasa más rentable, durante los 6 años el total de bagazo utilizado como combustible representa 29 676,6 Mt con respecto a las demás biomosas que poseen un comportamiento descendiente o irregular, presenta un ascenso significativo del total empleado en el año 2013 con respecto al 2018, correspondiente a un 45,63 % de incremento lo que equivale a 1 888,3 Mt más.

El uso de las fuentes renovables de energía para la generación de electricidad está estrechamente relacionado con la conservación del medio ambiente, y los resultados alcanzados en la provincia de Cienfuegos así lo demuestran.

En el territorio sureño se utilizan tres vías para entregar al Sistema Electroenergético Nacional electricidad limpia a partir de fuentes renovables; la

hidroenergía, la biomasa en los centrales azucareros y los parques solares; las que se deben incrementar en los próximos años (Rodríguez, 2014b).

### **1.5. Utilización del bagazo de caña de azúcar como combustible esencial en la cogeneración de energía eléctrica.**

Actualmente existe el uso de generadores de vapor en centrales azucareros que utilizan el bagazo en su producción, permitiendo la mezcla de diferentes tipos de combustibles.

El uso de bagazo como combustible se generaliza en los centrales azucareros, a su vez la generación de vapor toma rasgos que lo identifican.

Es indispensable el uso de calderas que proporcione un flujo de vapor a presión y temperatura constantes. En los centrales azucareros se manejan distintas presiones de vapor presión de 2.1 MPa, 340 °C, el flujo de vapor que proporcionan depende del diseño y tamaño. El bagazo produce el calor necesario para producir el vapor a las condiciones antes mencionadas.

Los centrales azucareros usan de manera indistinta los generadores de vapor, atendiendo a cambios en el flujo de presión, y en dependencia del tamaño. La calidad en su obtención reflejará el correcto funcionamiento de sus generadores.

Existe un sistema de conservación del bagazo sobrante durante el proceso normal; este es almacenado para ser utilizado durante paradas de molienda, en pacas o en la bodega bagacera (casa de bagazo). Los ingenios azucareros cuentan con calderas de alta y baja presión de vapor de agua, turbogeneradores de contrapresión de vapor.

#### **1.5.1 Caracterización del bagazo como combustible.**

El bagazo ha sido utilizado históricamente como combustible en la industria azucarera, y aun cuando su valor calórico es relativamente bajo (7 740 kJ/kg), al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que

no tienen disponibilidades significativas de combustible, y a la vez son grandes productores de azúcar de caña (Rios, 2017)

### 1.5.2 Composición física del bagazo.

La composición física del bagazo (Tabla 1.3) está constituida por cuatro fracciones las cuales se muestran en la siguiente tabla y su magnitud relativa está en dependencia del proceso agroindustrial azucarero.

Tabla 1.3: Composición física del bagazo.

| Componentes         | %     |
|---------------------|-------|
| Fibra o bagazo      | 45    |
| Sólidos no solubles | 2-3   |
| Sólidos solubles    | 2-3   |
| Agua                | 49-51 |

Fuente: (Rodriguez, 2014b).

La fibra representa aproximadamente el 45% en peso del bagazo, está compuesta de toda la fracción sólida orgánica, insoluble en agua, presente originalmente en el tallo de la caña, y que se caracteriza por su marcada heterogeneidad desde el punto de vista morfológico.

Los sólidos no solubles o fracción insoluble en agua, están constituidos principalmente por sustancias inorgánicas (piedras, tierra, materias extrañas) esta fracción, si bien pequeña, participa en la composición del bagazo y está grandemente influenciada por las condiciones del procesamiento agrícola de la caña, tipo de corte y de recolección.

Los sólidos solubles abarcan la fracción que se disuelve en agua, compuesta fundamentalmente por sacarosa, cuya extracción ulterior en el central no resulta económica, así como otros componentes químicos como ceras, en menor proporción (González, 2015).

### 1.5.3 Composición química del bagazo.

El carbono es el elemento principal de la parte combustible, pues es el que más calor desprende ya que, aunque el hidrógeno de forma específica por unidad de masa desprende más calor, se encuentra siempre en mucha menor cuantía y el azufre desprende poco calor durante su combustión. En la tabla 1.4 se presenta la composición química elemental del bagazo.

Tabla 1.4 Composición química del bagazo

| <b>Elementos<br/>químicos</b> | <b>Bagazo<br/>(%)</b> |
|-------------------------------|-----------------------|
| Carbono                       | 47,00                 |
| Hidrógeno                     | 6,50                  |
| Oxígeno                       | 44,00                 |
| Cenizas                       | 2,50                  |

Fuente: (Gutiérrez, 2017).

El oxígeno y el nitrógeno, como componentes de las sustancias combustibles, constituyen lastres orgánicos, ya que disminuyen la cantidad de elementos combustibles en dichas sustancias y por lo tanto disminuyen el calor liberado de forma específica, es decir, por unidad de masa.

### 1.5.4 Calor específico de combustión del bagazo

El bagazo posee un bajo calor específico de combustión:

- Calor Específico de Combustión Inferior CECI= 17 294 – 18 938 kJ/kg
- Calor Específico de Combustión Superior CECS= 18 900 – 19 655 kJ/kg

Esta variación se debe a los cambios en la composición elemental y en el contenido de azúcar; a su vez la composición elemental se ve influida por la variedad y la edad de la caña, el suelo y el grado de mecanización de la cosecha.

En la variación en el contenido de azúcar influye el ajuste de los molinos y la cantidad y temperatura del agua de imbibición que se suministre al bagazo durante la molido.

#### **1.5.5 Contenido de humedad.**

Esta es la propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor. Cuando el trabajo de los molinos es deficiente, el contenido de humedad del bagazo será de aproximadamente del 52 %; mientras que con un buen trabajo su contenido será de 48 %; normalmente oscila en un rango estrecho 44-50 % (Rodriguez, 2014a)

#### **1.5.6 Contenido de cenizas.**

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2,8 % de cenizas; y los residuos agrícolas cañeros, 9,5 aproximadamente. Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0,78 y 3,22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección. Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña.

### **1.6. Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera.**

En particular, la caña de azúcar exhibe índices más ventajosos que otros cultivos en cuanto al almacenamiento de energía proveniente de la radiación solar, como se aprecia en los aspectos siguientes:

- Es capaz de almacenar 1,7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1 % en campos bien atendidos con regadío.
- Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 t/ha, con un máximo teórico de 233 kg, que compara ventajosamente con otros cultivos.
- Para un valor calórico de 17 476 MJ/kg de materia seca (MS), con un contenido de materia seca de 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de

caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla al ingenio.

- Como promedio pueden emplearse las siguientes relaciones de sustitución:
- 5,2 toneladas de bagazo, 50 % de humedad por tonelada de petróleo (39,7 MJ/kg).
- Una tonelada de bagazo equivale a 231 m<sup>3</sup> de gas natural.
- Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja 30 % de humedad: 11,7 MJ/kg).
- El valor calórico del bagazo (50% humedad) es de 7,64 MJ/kg, semejante al de la madera: 7,9 MJ/kg (Gutiérrez, 2017)

### **1.7. Conclusiones parciales.**

1. En muchos países productores de azúcar a base de caña, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible.
2. El bagazo de caña ha sido utilizado históricamente como combustible en la industria azucarera y al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un valioso potencial energético.
3. La biomasa más utilizada como fuente de energía en Cuba es el bagazo de caña, y mediante los sistemas de cogeneración es aprovechada aún más por su elevado potencial energético.

## **Capítulo 2 Metodología de desarrollo.**

### **2.1. Caracterización de la UEB “Ciudad Caracas”.**

El actual ingenio azucarero fue fundado en junio de 1861 por Don Tomás Terry Adams, natural de Caracas, Venezuela y aparece registrado en el folio 3140 como “Ciudad Caracas”. A principios de la década de 1940, el Banco Boston vende el ingenio a los magnates azucareros Lobo-Escobedo-Caicedo quienes lo mantuvieron hasta el triunfo de la Revolución cuando fue nacionalizado.

La UEB Central Azucarero “Ciudad Caracas” fue creado por Resolución 222/2006 del Ministerio de Azúcar con domicilio legal en el batey del mismo nombre y está situada gráficamente en el municipio de Santa Isabel de las Lajas, provincia de Cienfuegos. Limita al norte con la UEB Efraín Alfonso de Villa Clara, al sur con la UEB Elpidio Gómez, al Este con el municipio de Cruces, y al Oeste con la UEB 5 de Septiembre. Se localiza en la carretera a Lajas, a 4 kilómetros del poblado de igual nombre y a 46 kilómetros del municipio de Cienfuegos, y pertenece a la Empresa Azucarera Cienfuegos.

#### **2.1.1 Breve descripción de proceso productivo en un central azucarero.**

La caña de azúcar después de ser cortada es llevada a los centros de limpieza, luego es transporta por tiro directo al ingenio o enjaulas de ferrocarril, es recibida en la báscula donde se determina su peso. Después se transporta al basculador, donde es conducida desde el punto de descarga hacia los rompebultos que son los encargados de romper el colchón de caña, pasan a los niveladores o gallegos para facilitar el trabajo de las cuchillas que están destinadas a nivelar los puntos demasiados abultados de caña que se encuentra en los conductores.

Luego continúa al proceso de extracción del jugo mediante cinco molinos constituidos por cuerpos cilíndricos de hierro fundido. En esta etapa se obtiene bagazo (que se utiliza en las calderas de vapor) y el jugo mezclado para la posterior producción de azúcar crudo. El jugo que viene de los molinos es

alcalizado por la adicción de lechada de cal, el encalamiento tiene dos etapas fundamentales, una es prealcalización en frío y la otra es la rectificación en caliente.

El jugo pasa a los calentadores que estos son capaces de elevar la temperatura hasta un rango de 1030- 1050 °C y luego a la Torre de Floculación donde ocurre la alcalización en caliente el cual está provisto de deflectores para lograr una mezcla homogénea entre el jugo y la cal. El objetivo de la Torre de Floculación es buscar que el jugo entre al clarificador con temperatura estable, régimen laminar y que por el flascheo al estar comunicado a la atmósfera se escapen las burbujas de aire que vienen ocluidas debido al bombeo, efectuar una extracción de jugo claro entre 10% y 15% que no entra al clarificador, eliminar una porción del bagacillo que viene en el jugo, así como facilitar una mezcla homogénea del floculante y del jugo. Con la reacción de cal y una completa precipitación de fosfato tricálcico se forman los núcleos de sedimentación que arrastran las impurezas hacia el fondo del clarificador y forman el lodo. Esta es extraída a gravedad a un recipiente cilíndrico con movimiento interior llamado cachazón donde se mezcla con el bagacillo fino proveniente de los molinos para formar la torta que pasa a los filtros con el fin de extraerle el jugo que contienen. Al jugo claro que proviene del clarificador se le determina el pH (que debe estar entre 6.7-7.2). Luego pasa por un filtro de jugo claro para eliminar la presencia de partículas finas, o sea, el bagacillo. Después que el jugo se filtra pasa para los pre-evaporadores donde existe una evaporación primaria, éstos operan relativamente a presiones muy altas, luego el proceso continúa hacia los evaporadores, aquí ocurre una evaporación secundaria porque se consume el vapor de escape o vapor de jugo de los evaporadores primarios, además estos vasos tienen como función de concentrar el jugo y eliminar la mayor cantidad de agua a un 75 %. La meladura que proviene de los evaporadores es conducida a los tachos donde se sigue concentrando hasta que aparezcan los cristales de azúcar. Los cristales se alimentan con meladura y alcanzan un tamaño adecuado para ser purgados en la templa. De aquí se obtiene el primer azúcar comercial y miel A, ésta se utiliza nuevamente para la fabricación y cuando es purgada se obtiene azúcar de

segundo y miel B, de esta miel B se obtiene azúcar de tercera (semilla) la cual es utilizada como base para la fabricación de azúcar comercial y miel final. Las masas cocidas A y B se descargan en los cristalizadores de primera y segunda y la masa cocida C en los cristalizadores de tercera. Cuando las masas cocidas pasan a las centrifugas que tienen una forma cilíndrica y tienen como función, separar la miel de los cristales, o sea, recibir la masa cocida y dar salida a la miel. Esta es la última etapa del proceso donde se obtiene el azúcar de primera y de segunda, es decir, el azúcar comercial, el azúcar de tercera o semilla y la miel final que sale de la fábrica. Luego esta azúcar comercial que sale de la centrífuga pasa por un conductor hacia las tolvas, donde es ensacada y transportada hacia el puerto o a su destino final (Ver anexo 1).

## **2.2. Metodología de desarrollo de la investigación.**

La planta de caña de azúcar ocupa uno de los primeros lugares en el reino vegetal en cuanto a su efectividad de conversión de energía solar en biomasa, por unidad de tiempo y por unidad de superficie cultivada, lo que se refleja en el alto contenido exergético acumulado. En condiciones determinadas puede resultar ventajoso desviar total o parcialmente los esquemas de producción hacia la obtención de energía en detrimento de las producciones tradicionales.

La sustitución de combustible fósil por biomasa en la generación de energía eléctrica tiene una enorme influencia ambiental, en particular por la disminución del desequilibrio del carbono en la atmósfera.

En el caso de estudio se pretende realizar un estudio técnico-económico de la mesa alimentadora de bagazo que abastece a las calderas un flujo constante del mismo, y los beneficios que tributa en estabilizar e incrementar la generación de vapor y por consiguiente la generación de energía eléctrica. Por consiguiente, se propone la siguiente metodología (Ver Fig. 2.1).

A continuación se describe el desarrollo de dicha metodología para facilitar su comprensión y futura generalización:

Paso 1: se realiza una revisión bibliográfica mediante la búsqueda de tesis, artículos, revistas, y diversa documentación fiable referente al tema.

Paso 2: Se selecciona parámetros para el estudio basándose en el análisis del uso y consumo de energía, identificando las características del área de generación de energía.

Paso 3: Se realizan los balances de masa y energía en el área de generación de energía.

Paso 4: se establece un análisis comparativo en términos de generación y consumo de energía correspondientes a la zafra 2020-2021 respecto a las zafas de dos años anteriores.

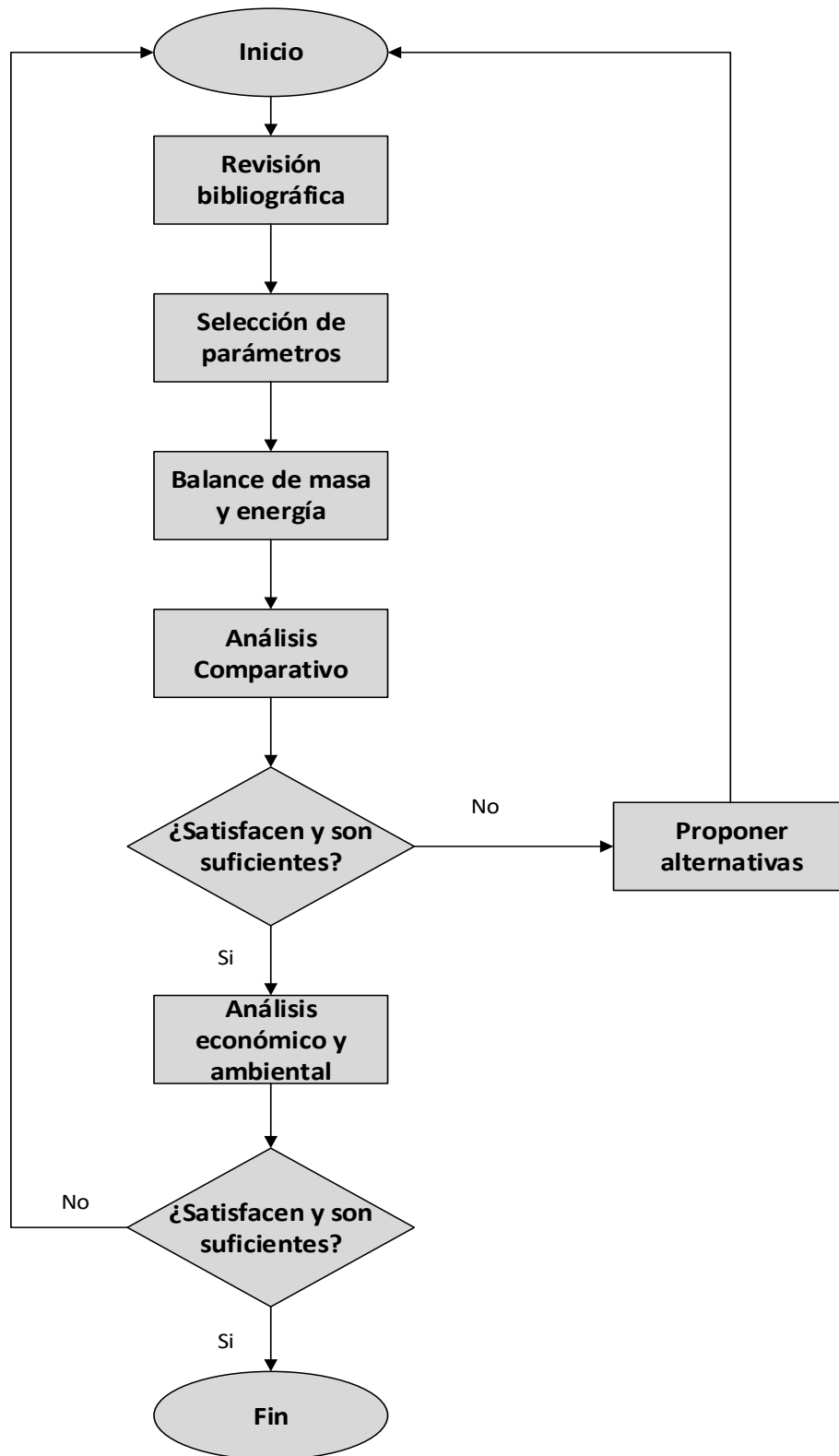


Figura 2.1: Metodología elaborada. Fuente: elaboración propia

### 2.2.1 Descripción de las instalaciones tecnológicas del área de generación en la UEB “Ciudad Caracas”.

#### Molida de caña.

La Industria cuenta con una norma potencial de 3 795 t caña por día, en la actualidad, pudiendo lograr con el equipamiento existente en molinos una norma potencial de: 5 114 t caña por día.

#### Manipulación de la caña.

Se cuenta con un virador de camiones y uno de carro de ferrocarril para la recepción de la caña. Tres esteras estandarizadas trasladan la caña hacia los molinos; la primera estera cuenta con dos alzadoras para descolmar los carros, la segunda y tercera cuentan con una cuchilla cada una, las cuales son movidas por motores eléctricos y de esta manera realizan la preparación de la caña para su molida. También existen cinco molinos de 7 pies (2,13 m) de longitud de mazas donde se muele la caña.

Los equipos instalados en los molinos son motores eléctricos:

Tabla 2.1 Parámetros de los motores instalados en los molinos

| <b>Motores<br/>eléctricos</b> | <b>Poten<br/>cia (kW)</b> | <b>Veloci<br/>dad (1/s)</b> |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Molino 1 y 5                  | 500                       | 900                         |
| Molino 2,3,4                  | 320                       | 9                           |

**Fuente:** Datos del central

#### Área de calderas

Esta área posee dos calderas alemanas de 25 t/h de vapor a una presión de 1,8 MPa y 320 °C de temperatura usando como combustible el bagazo, el cual consume una cantidad aproximada de 35 t/h. En el área existe una chimenea para

las tres calderas. Para el almacenaje del bagazo se cuenta con una casa de bagazo, con una máquina para la retroalimentación.

Este central posee instalaciones en calderas con índices de generación de 2,15 t vapor por t bagazo y un índice de generación de 35,8 kWh por t caña en planta eléctrica; el consumo interno es de 0,0245 MWh por t caña y una entrega al SEN de 14,3 kWh por t caña.

Para el almacenaje del bagazo se cuenta con una casa de bagazo y la mesa alimentadora de bagazo. Dicha mesa fue montada en julio de 2020 y ha traído consigo numerosas mejoras y beneficios para el proceso y para la calidad de vida de los trabajadores del área de generación de electricidad. Esta tecnología es básicamente una caja hecha en lámina, con dimensiones de 12 metros de largo, 5 metros de ancho y 7 de altura; los materiales que se utilizaron para su ensamblaje fueron en su mayoría materiales de uso en la empresa como láminas de hierro y zinc. Consta de 5 pisos inclinados en su interior encargado de entregar y dosificar la carga de bagazo hacia las calderas y estabilizar la generación de vapor. Dicha mesa tiene un sistema de seguridad en la cúspide, al estar al 100% de su capacidad el bagazo sobrante es introducido a unos transportadores que lo envían directamente a la casa de bagazo donde es almacenado y posteriormente es reutilizado.

#### Planta eléctrica.

La planta eléctrica cuenta con una subestación de entrada de 6,3 kV dotada con 2 transformadores de 1 600 kVA conectados en paralelo lo cual permite en las condiciones actuales el buen funcionamiento de la planta eléctrica, en lo que respecta a la entrega de energía eléctrica al SEN con los siguientes parámetros: Índice de generación 38,0 kWh/tonelada de caña molida y de entrega de 11,0 kWh/tonelada de caña molida.

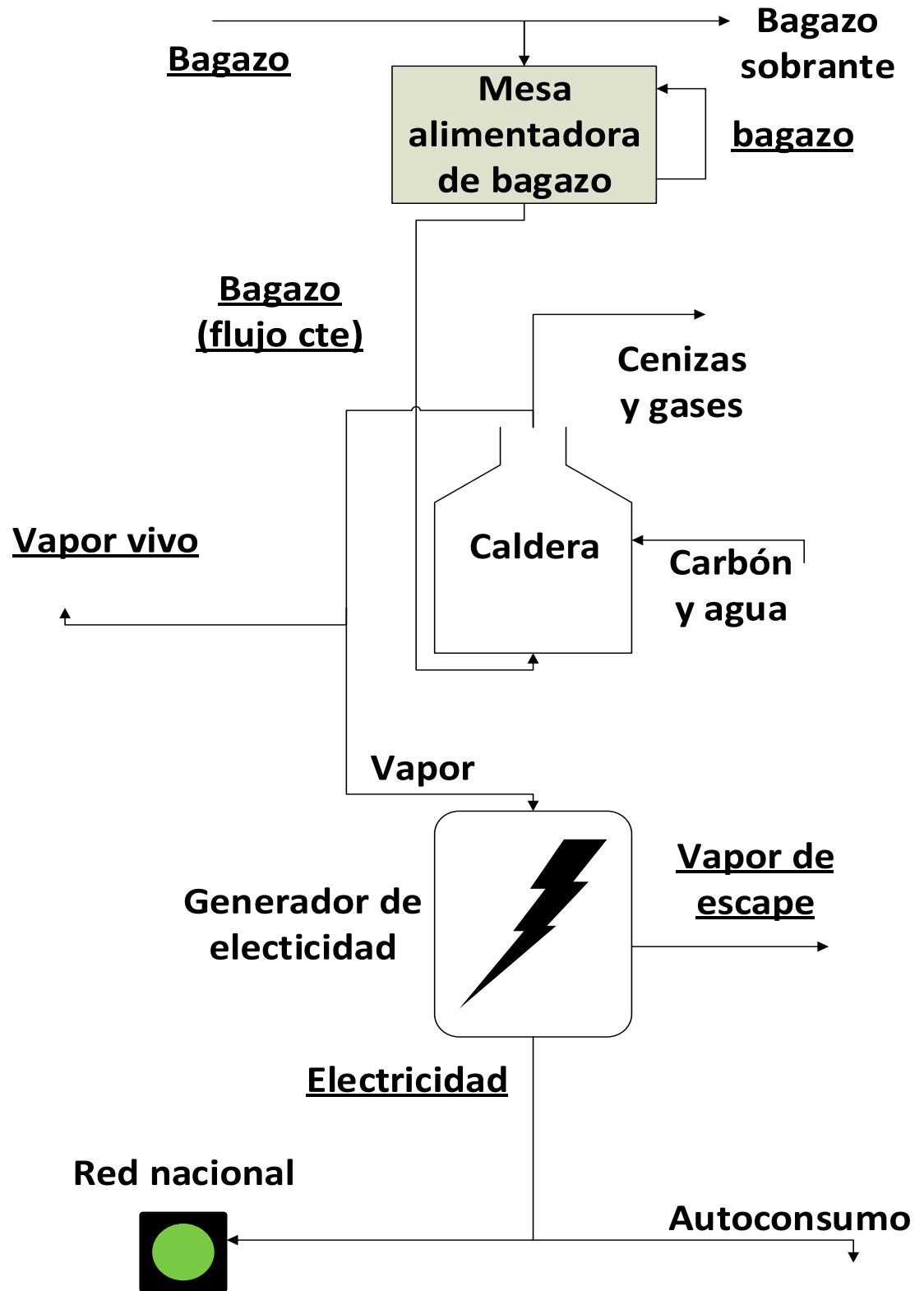


Figura 2.2 Diagrama de flujo del área de generación de electricidad.

### 2.2.2 Análisis energético en el área de generación de energía.

Se desarrolló todo el balance de energía, con la consecuente valoración de la generación y consumos de vapor por las diferentes actividades del proceso productivo, a partir de las características y tiempo de trabajo de los diferentes equipos tecnológicos.

Los datos usados pertenecen en tiempo real, al Central Azucarero “Ciudad Caracas” en la zafra 2020-2021 estimada en 120 días, estimándose de igual modo, el tiempo perdido por limpiezas y paradas y, por tanto, el tiempo efectivo de molienda. Se consultaron datos de la bibliografía, los que se utilizaron como referentes en la discusión de los resultados, incluido el aporte económico.

Para el análisis se tomaron como referentes en el trabajo la metodología desarrollada por (Morales, 2017) implementada en el Central azucarero “Carlos Baliño” de la provincia Villa Clara.

Tabla 2.2 Información general asociada a la zafra 2020-2021.

|                       | % caña | kg/h       |
|-----------------------|--------|------------|
| <b>G cal</b>          |        | 108 515,45 |
| <b>Bagazo en caña</b> | 33,6   | 58 759,20  |
| <b>Caña molida</b>    |        | 95833,33   |

Fuente: datos del central

### 2.2.3 Balances de Energía

- Balance en los turbogeneradores

$$G_{TG} = \frac{860 \cdot N_{TG}}{H_0 \cdot \eta_t \cdot \eta_{elec} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{tubo}} \quad (2.1)$$

$$H_0 = h_0 - h_2' \quad (2.2)$$

$$N_t = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_2'} \quad (2.3)$$

- Balance en las calderas.

Valor calórico neto del bagazo

$$VCN = (4250 - 4850 * \omega) \quad (2.4)$$

Pérdidas de calor en gases de escape

$$Q_p = \left[ t_g * (1 - \omega) * \left( 1,4 * m + \frac{0,5}{(1-\omega)} - 0,12 \right) \right] \quad (2.5)$$

Calor recuperado en el vapor

$$Q_v = (VCN - Q_p) * \alpha * \beta * \gamma \quad (2.6)$$

Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua

$$Q_n = h_0 - h_a \quad (2.7)$$

Índice de generación

$$IG = \frac{Q_v}{Q_n} \quad (2.8)$$

- Cálculo del bagazo

Bagazo combustible según molida

$$Bc = Bagazo - ME \quad (2.9)$$

$$ME = 1,2 \% Bagazo$$

Sobrante de bagazo

$$SB = B_c - G_{cal} \quad (2.10)$$

Bagazo acumulado

$$Bag_{acumul} = SB * ND * 24 * \frac{FC}{1000} \quad (2.11)$$

$$ND = 120 \text{ días de zafra}$$

$$FC = 0.85 \text{ Factor de capacidad, fracc}$$

Masa de bagazo quemado

$$Bq = Bc - SB \quad (2.12)$$

**Eficiencia en calderas**

$$\eta_{cal} = \frac{G_{cal} Q_n}{B_q * VCN} * 100 \quad (2.13)$$

#### 2.2.4 Resultados obtenidos

Tabla 2.3 Resultado de cálculos de consumo de vapor en los turbogeneradores.

| Parámetros                | Nomenclatura   | Valor     | Unidad de medida |
|---------------------------|----------------|-----------|------------------|
| Turbogenerador 1          | G <sub>1</sub> | 45 028,76 | kg/h             |
| Turbogenerador 2          | G <sub>2</sub> | 28 442,37 | kg/h             |
| Total de Turbogeneradores | G <sub>t</sub> | 73 471,13 | kg/h             |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4 Resultados obtenidos vapor generado en la caldera

| Parámetros                           | Nomenclatura | Valor    | Unidad de medida |
|--------------------------------------|--------------|----------|------------------|
| Valor calórico neto del bagazo       | VCN          | 1 819,67 | kcal/kg          |
| Pérdidas de calor en gases de escape | Qp           | 342,20   | kcal/kg bag      |
| Calor recuperado en el vapor         | Qv           | 1 265,08 | kcal/kg          |
| Calor necesario para 1 kg de agua    | Qn           | 634,36   | kcal/kgv         |
| Índice de generación                 | IG           | 1,99     | kgv/kg bag       |
| Bagazo combustible según molida      | Bc           | 51 128   | kgbag/h          |
| Sobrante de bagazo                   | SB           | 4 345,43 | kg bag/h         |
| bagazo quemado                       | Bq           |          | tbag/h           |
| Bagazo acumulado                     | Bag acuml    | 18 529   | tbag             |
| Eficiencia en las calderas           | $\eta_{cal}$ | 69.52    | %                |

Fuente: Elaboración propia

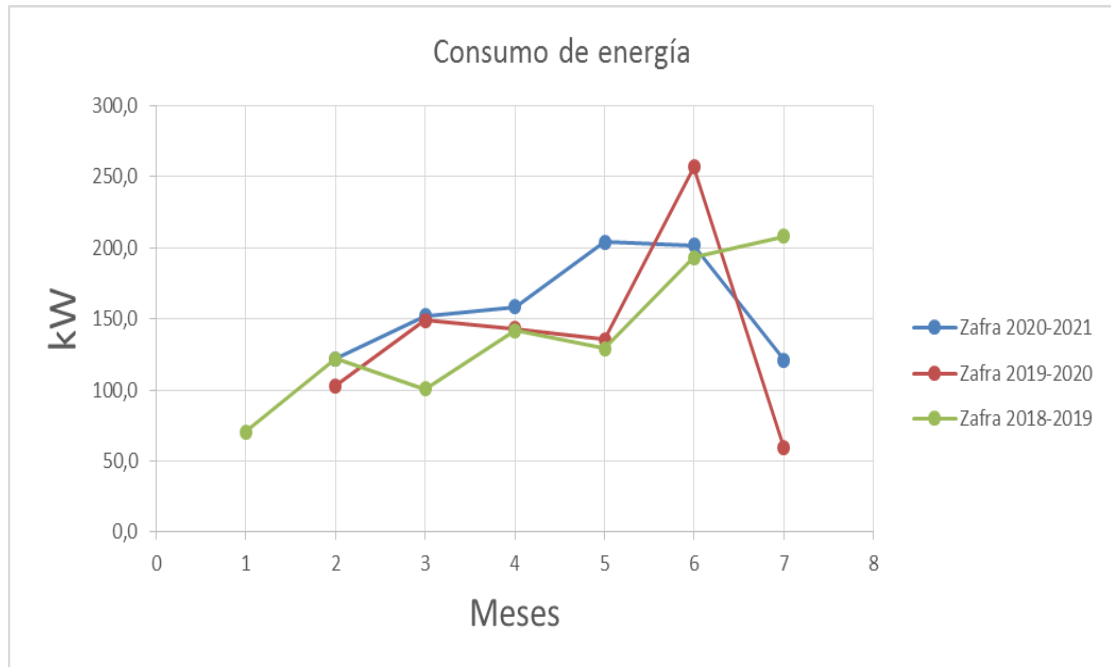
### 2.2.5 Comportamiento de parámetros energéticos.

Primeramente hay que añadir que con la instalación de la mesa alimentadora se estabiliza la generación de vapor en las calderas y como consecuencia favorece la generación de electricidad, así mismo mejora los indicadores energéticos como son la eficiencia, el índice de generación, bagazo sobrante, etc.

Para analizar el comportamiento de los parámetros energéticos se realiza a partir de los datos de generación y consumo de la UEB ``Ciudad Caracas`` de las

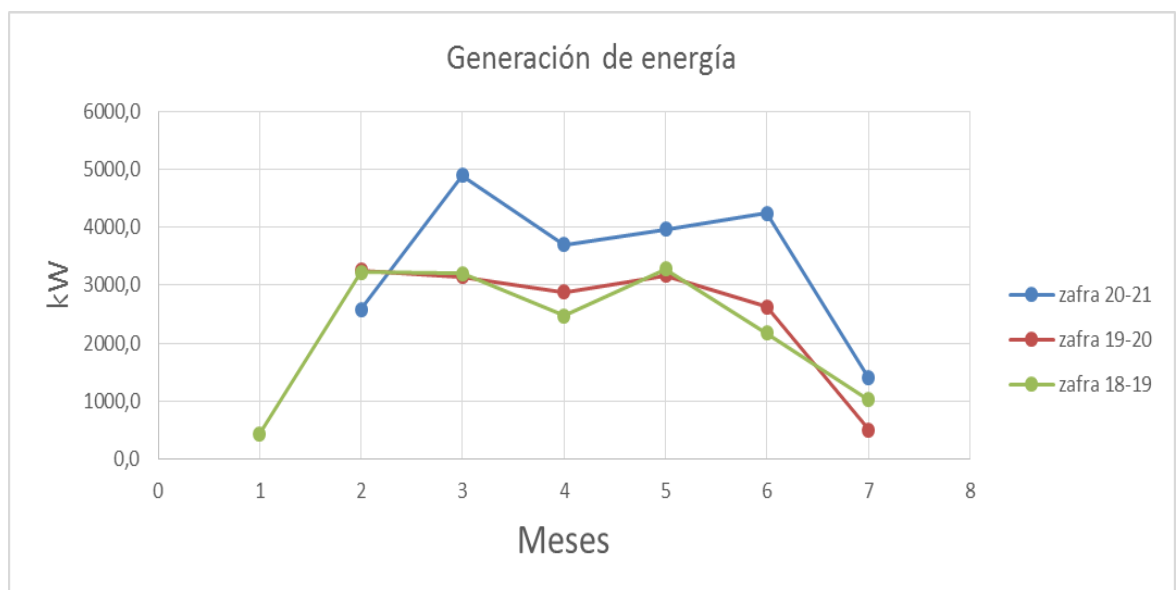
zafras correspondientes a la zafra 2020-2021 en comparación a las zafras de dos años anteriores (2018-2019 y 2019-2020); los datos de comparación se representan en los anexos 3, 4 y 5.

Gráfico 2.1 Comportamiento del consumo de energía.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2.2 Comportamiento de generación de energía.



Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia el comportamiento del consumo energético de la zafra 2020-2021 fue similar en los meses de diciembre a febrero con respecto a las zafas anteriores, en el mes de marzo tuvo un mayor consumo y en los restantes meses tuvo un comportamiento similar a la zafra 2018-2019. La electricidad generada como muestra el gráfico 2.2 se comportó de manera muy favorable, es capaz de autoabastecer la demanda de la industria, a pesar de que aproximadamente un 2 % de la energía total consumida es comprada al SEN. Es significativa la entrega de energía eléctrica al sistema nacional, lo cual se traduce en beneficios desde el punto de vista financiero para la fábrica.

### **2.3. Conclusiones parciales.**

1. La implementación de la metodología elaborada permitió un análisis del comportamiento energético de las áreas de generación de vapor y generación de energía.
2. Con la implementación de la mesa alimentadora de bagazo se estabilizó la generación de vapor en las calderas y como consecuencia la generación de electricidad.

## Capítulo 3 Análisis del impacto económico y medioambiental.

Hoy en día, un central azucarero no se considera económica y tecnológicamente factible, si no genera suficiente vapor y energía eléctrica para sí mismo y para comercializar, siendo esta última una potencial fuente de ingreso para estas industrias, lo que sumado a su autonomía energética y la contribución que hacen a una producción renovable y más limpia de la energía, las hace mucho más atractivas; las Bioenergéticas como tecnología están abriendo es este sentido, nuevos caminos por lo que Cuba está empezando a transitar. (Rodríguez, 2014a)

Desde el anterior posicionamiento y tomado como base los resultados anteriormente obtenidos, se realizará un análisis técnico-económico y ambiental del central azucarero en la generación de electricidad. El principal objetivo de este análisis se enfocará al efecto económico de la venta de energía eléctrica al Sistema Electro Energético Nacional (SEN), sin tomar en cuenta en este análisis, los ingresos por el azúcar y el alimento animal vendidos.

El central azucarero vende la energía eléctrica a 0.11311 CUP por kW.

### 3.1 Análisis económico

#### Generación de electricidad de las turbinas

Trabajo realizado por una turbina es dado en la ecuación

$$W = H_1 - H_2 \quad (3.1)$$

Donde:

$W$ : Trabajo de la turbina

$H_1$ : Entalpía del vapor a la entrada de la turbina. (KJ/kg)

$H_2$ : Entalpía del vapor a la salida de la turbina. (KJ/kg)

Nota: los valores de  $H_1$  y  $H_2$  se determinaron mediante el Diagrama de Mollier, bajo las condiciones de presión y temperatura del vapor a la entrada y salida del turbogenerador.

Turbina # 1:

$$W = 3120,84 \frac{kJ}{kg} - 2739,80 \frac{kJ}{kg} = 381,04 \frac{kJ}{kg} \quad (3.2)$$

Turbina # 2:

$$W = 3120,84 \frac{kJ}{kg} - 2739,80 \frac{kJ}{kg} = 381,04 \frac{kJ}{kg} \quad (3.3)$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador.

$$E_{turbo} = W_{turbo} * m_{turbo} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} \quad (3.4)$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador 1:

$$E_{turbo_1} = W_{turbo_t} * m_{turbo_t} = 381,04 \frac{kJ}{kg} * 12,51 \frac{kg}{s} = 4766 \frac{kJ}{s} = 4766 kW \quad (3.5)$$

$$E_{SIGE1} = E_{turbo1} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} \quad (3.6)$$

$$= 4766,81kW * 0,59 = 2812,42kW$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador 2:

$$E_{turbo_2} = W_{turbo_t} * m_{turbo_t} = 381,04 \frac{kJ}{kg} * 7,90 \frac{kg}{s} = 3010,22 \frac{kJ}{s} = 3010,22kW \quad (3.7)$$

$$E_{SIGE1} = E_{turbo1} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} \quad (3.8)$$

$$= 3010,22kW * 0,59 = 1776,03kW$$

Energía eléctrica producida por los turbogeneradores:

Se asume que las zafras están programadas para una duración de 120 días y cada 11 días se debe realizar una parada de 1 día de mantenimiento, a lo que se

adiciona un 5% de paradas de emergencia. Dado que los equipos analizados trabajan 24 horas en régimen continuo ello da un total de 2 472 h de trabajo efectivo/zafra.

$$E_{total\ producida} = (E_{sige1} + E_{sige2}) * horas\ de\ trabajo(2472) \quad (3.9)$$

$$= 4588,45kW * 2472h = 11\ 356\ 413,8\ kWh$$

Tabla 3.1 Cálculo de precios de entrega en kW Zafra 2018-2019.

| Entrega<br>madrugada(kWh) | Entrega<br>día(kWh) | Entrega<br>pico(kWh) | Entrega<br>total(kWh) |
|---------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| (a)                       | (b)                 | (c)                  | (d)=(a)+(b)+(c)       |
| 1032,20                   | 1287,50             | 543,00               | 2862,70               |

| Precio<br>madrugada<br>(CUP) | Precio día (CUP) | Precio pico<br>(CUP) | Precio promedio<br>total(CUP) |
|------------------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|
| (e)                          | (f)              | (g)                  | (h)=(l)/(d)                   |
| 0,07575                      | 0,10781          | 0,20361              | 0,11311                       |

| Importe pagar<br>madrugada<br>(CUP/kWh) | Importe pagar<br>día<br>(CUP/kWh) | Importe pagar<br>pico (CUP/kWh) | Importe pagar<br>total (CUP/kWh) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| (i)                                     | (j)                               | (k)                             | (l)=(i)+(j)+(k)                  |
| 78,18915                                | 138,8053                          | 110,5602                        | 323,7999                         |

Fuente: Elaboración propia.

Energía eléctrica consumida en la producción de azúcar:

En Cuba la norma de molida día se expresa en t/h. Considerando que una tonelada es equivalente a 88 @, la capacidad de molida del central de 3 683 t/día (153.46 t/hora). Se tiene que el Central azucarero requiere como promedio 20 HP/THC de potencia instalada, multiplicando la molida horaria por este índice

$$E_{produccion} = 153,46 \frac{t}{h} * 20 \frac{HP}{TCH} = 3069,20HP \quad (3.10)$$

$$= 2288,70kW * 2472 h = 5\,657\,666,4 kWh$$

Este valor es el consumo del Central azucarero como tal, según la potencia instantánea demandada

$$I_{ahorro} = E_{produccion} * horas\ de\ trabajo(2472)h * 0,11311 \frac{CUP}{kWh} \quad (3.11)$$

$$= 639\,938,6465 \$$$

#### Energía eléctrica vendida al SEN

$$I_{venta} = (E_{total\ producida} - E_{produccion}) * 0,11311 \frac{CUP}{kWh} \quad (3.12)$$

$$= (11\,356\,413,8 kWh - 5\,657\,666,40kWh) * 0,11311 \frac{CUP}{kWh}$$

$$= 5698747,40kWh * 0,11311 \frac{CUP}{kWh} = 644\,585,3184 CUP$$

**Efecto económico total del Central azucarero por generación de energía eléctrica (consumo propio más venta)**

$$I_{total} = I_{venta} + I_{ahorro} \quad (3.13)$$

$$= 644585,3184 CUP + 639938,6465 CUP = 1\,284\,523,9649 CUP$$

Tabla 3.2 Cálculo de precios de entrega en kW Zafra 2019-2020.

| Entrega madrugada (kWh) | Entrega día (kWh) | Entrega pico (kWh) | Entrega total (kWh) |
|-------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| (a)                     | (b)               | (c)                | (d)=(a)+(b)+(c)     |
| 1012,4983               | 1348,3211         | 393,1806           | 2754,0              |

| Precio madrugada (CUP) | Precio día (CUP) | Precio pico (CUP) | Precio promedio total (CUP) |
|------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| (e)                    | (f)              | (g)               | (h)=(l)/(d)                 |
| 0,07575                | 0,10781          | 0,20361           | 0,11311                     |

| Importe pagar madrugada (CUP/kWh) | Importe pagar día (CUP/kWh) | Importe pagar pico (CUP/kWh) | Importe pagar total (CUP/kWh) |
|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| (i)                               | (j)                         | (k)                          | (l)=(i)+(j)+(k)               |
| 76,6967                           | 145,3624                    | 80,0555                      | 311,5049                      |

Energía eléctrica consumida por la producción.

$$E_{produccion} = 168,53 \frac{t}{h} * 20 \frac{HP}{TCH} = 3370,6HP = 2557,40kW * 2472 h$$

$$= 6321892,8 kWh$$

Este valor es el consumo del Central azucarero como tal, según la potencia instantánea demandada

$$I_{ahorro} = E_{produccion} * horas\ de\ trabajo(2472)h * 0,11311 \frac{CUP}{kWh} = 715069,2946\ CUP$$

Energía eléctrica vendida al SEN

$$I_{venta} = (E_{total\ producida} - E_{produccion}) * 0,11311 \frac{CUP}{kWh}$$

$$= (11\ 356\ 413,8\ kWh - 6321892,8\ kWh) * 0,11311 \frac{CUP}{kWh}$$

$$= 5\ 034\ 521kWh * 0,11311 \frac{CUP}{kWh} = 660\ 025,7031\ CUP$$

Efecto económico total del Central azucarero por generación de energía eléctrica (consumo propio más venta)

$$I_{total} = I_{venta} + I_{ahorro} = 660\ 025,7031\ CUP + 715069,2946\ CUP \\ = 1\ 375\ 094,9977\ CUP$$

Tabla 3.4 Cálculo de precios de entrega en kW Zafra 2020-2021.

| Entrega<br>madrugada<br>(kWh) | Entrega día<br>(kWh) | Entrega pico<br>(kWh) | Entrega total<br>(kWh) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| (a)                           | (b)                  | (c)                   | (d)=(a)+(b)+<br>(c)    |
| 988,4530                      | 1319,7845            | 280,4825              | 2588,72                |

| Precio<br>madrugada<br>(CUP) | Precio día (CUP) | Precio pico<br>(CUP) | Precio promedio<br>total (CUP) |
|------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|
| (e)                          | (f)              | (g)                  | (h)=(l)/(d)                    |

|        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|
| 2,2520 | 2,7320 | 4,4833 | 3,1557 |
|--------|--------|--------|--------|

| Importe pagar<br>madrugada<br>(CUP/kWh) | Importe pagar<br>día<br>(CUP/kWh) | Importe pagar<br>pico (CUP/kWh) | Importe pagar<br>total (CUP/kWh) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| (i)                                     | (j)                               | (k)                             | (l)=(i)+(j)+(k)                  |
| 2225,9961                               | 3589,8138                         | 1237,4871                       | 8169,2237                        |

Energía eléctrica consumida por la producción

$$E_{produccion} = 160,8 \frac{t}{h} * 20 \frac{HP}{TCH} = 2996HP = 3216kW * 2472 h = 7\,949\,952kWh$$

Este valor es el consumo del Central azucarero como tal, según la potencia instantánea demandada

$$\begin{aligned} I_{ahorro} &= E_{produccion} * horas\ de\ trabajo(2472)h * 3,1557 \frac{CUP}{kWh} \\ &= 25\,087\,663,5264\ CUP \end{aligned}$$

Energía eléctrica vendida al SEN

$$\begin{aligned} I_{venta} &= (E_{total\ producida} - E_{produccion}) * 3,1557 \frac{CUP}{kWh} \\ &= (11\,356\,413,8\ kWh - 7\,949\,952kWh) * 3,1557 \frac{CUP}{kWh} \\ &= (11\,356\,413,8\ kWh - 7\,949\,952kWh) * 3,1557 \frac{CUP}{kWh} \end{aligned}$$

Efecto económico total del Central azucarero por generación de energía eléctrica (consumo propio más venta)

$$I_{total} = I_{venta} + I_{ahorro} = 10\,749\,771,5022 \text{ CUP} + 25\,087,663.5264 \text{ CUP} \\ = 35\,837\,435,0286 \text{ CUP}$$

En el siguiente gráfico (3.1) se representa el índice económico de generación de energía en las tres zafras estudiadas:

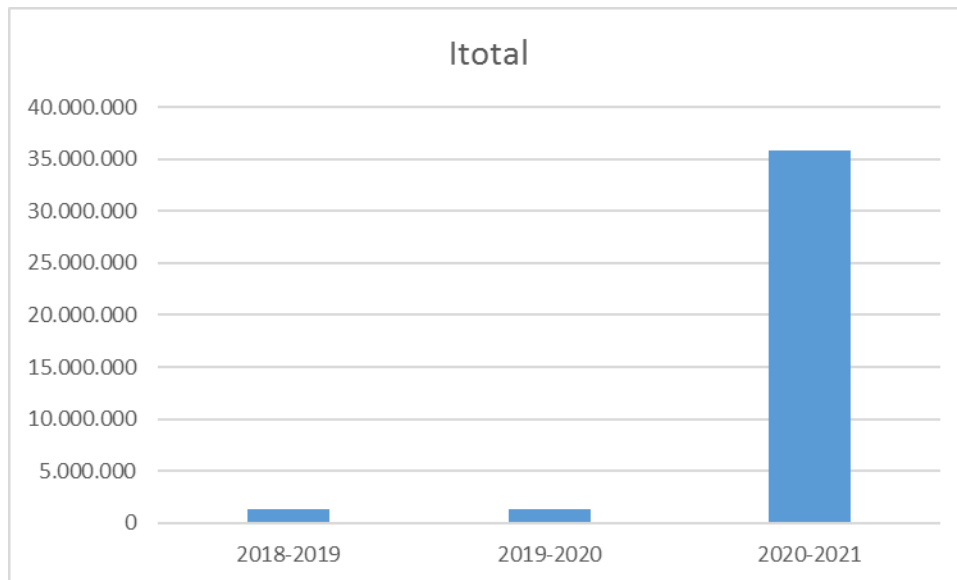


Gráfico 3.1 Análisis económico comparativo.

Al analizar el gráfico 3.1 podemos llegar a la conclusión de que la mesa alimentadora de bagazo cumple la función de estabilizar la generación de vapor y por consiguiente la generación de electricidad pero no es solo por la influencia de este equipo que el efecto económico total de la última zafra (2020-2021) es tan elevado, también está la influencia del reordenamiento monetario que tuvo efecto a principios de enero de 2021. Al incrementarse el precio de la venta de energía el importe que generaba antes es mucho menor que el de la última zafra como se puede apreciar en el gráfico.

### 3.2 Análisis del beneficio medioambiental.

En la actualidad las industrias que utilizan calderas modernas de biomasa no producen humos como las antiguas chimeneas de leña, y sus emisiones son comparables a los sistemas modernos de gasóleo C y gas. La composición de

estas emisiones es básicamente parte del CO<sub>2</sub> captado por la planta origen de la biomasa y agua, con una baja presencia de compuestos de nitrógeno y con bajas o nulas cantidades de azufre, uno de los grandes problemas de otros combustibles. La mayor ventaja es el balance neutro de las emisiones de CO<sub>2</sub>, al cerrar el ciclo del carbono que comenzaron las plantas al absorberlo durante su crecimiento, ya que este CO<sub>2</sub> sólo proviene de la atmósfera en la que vivimos y necesita ser absorbido continuamente por las plantas si se desea mantener en funcionamiento la producción energética con biomasa.

En la industria azucarera a partir de la caña de azúcar concurren dos aspectos especiales: ser alta consumidora de energía eléctrica y tener la posibilidad de autoabastecerse de toda la energía térmica que requiere, generar sobrantes de biomasa cañera para ser usada como combustible o materia prima de otras industrias de derivados. Estas características permiten fijar como metas el empleo máximo de la biomasa disponible; lo que brinda la posibilidad de disponer de cantidades apreciables de biomasa cañera para lograr una máxima generación de energía eléctrica, satisfacer los consumos, exportar a la red nacional y también puede ser considerada la posibilidad de entregar esta biomasa como materia prima a otras industrias y reducir así los costos de fabricación del azúcar (Valdez, 2004).

En la década del 70 se inició un amplio proceso de reconversión de hornos y calderas para pasar definitivamente a la utilización del bagazo de caña como combustible. Una de las características que posee la planta que le da origen a este combustible es su regeneración anual, además de que está científicamente reconocida, junto al sorgo rojo, como una de las plantas que hace una mejor transformación de la energía solar en su ciclo vital.

En la siguiente tabla se puede apreciar la composición elemental del bagazo

Tabla 3.5 Composición elemental del bagazo.

| <b>Compuesto Composición</b>                 | <b>(%)</b> |
|----------------------------------------------|------------|
| Holocelulosa                                 | 70-75      |
| Celulosa                                     | 45-50      |
| Hemicelulosa                                 | 20-25      |
| Lignina y otros residuos<br>no hidrolizables | 20-25      |
| Ceniza, azúcares y otros<br>compuestos       | 5-10       |

Fuente: (Quintana, 1998)

La cantidad de bagazo consumida es mucho mayor que la de petróleo, lo cual está dado por el hecho de que el calor específico de combustión del bagazo es aproximadamente seis veces inferior al del petróleo equivalente.

Al ser el bagazo un combustible de biomasa, no se utilizan combustibles fósiles para la cogeneración, lo cual reduce la emisión de gases efecto invernadero, ayudando así a la mitigación del calentamiento global; además de disminuir la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la cantidad de gas emitida a la atmósfera cuando se quema bagazo es casi tres veces superior a la cantidad que se emitiría si se utilizara el hidrocarburo. Esta comparación podría ser engañosa, ya que mientras el petróleo hace un aporte neto de gas, el bagazo como biomasa combustible, mantiene un equilibrio, ya que durante su crecimiento la planta de caña de azúcar absorbe una cantidad similar a la que aporta cuando se quema en los hornos, por lo que la ventaja, desde el punto de vista de contaminación atmosférica, en especial en la contribución al calentamiento global producido por el efecto invernadero, es evidente.

En lo referente a la generación de  $\text{SO}_2$  la comparación es muy favorable para el bagazo, dada la muy escasa presencia de azufre en su composición elemental.

Un aspecto negativo a tener en cuenta cuando se utiliza el bagazo como combustible es la emisión de partículas sólidas, las cuales abandonan la chimenea y pueden ser arrastradas por los vientos a grandes distancias, cayendo más tarde en los núcleos poblacionales y disminuyendo las condiciones de saneamiento de estos, a la vez que pueden incidir en diferentes enfermedades respiratorias, y si tenemos en cuenta que en muchas ocasiones la industria azucarera se asocia a la de producción de otros derivados como (alcoholes y levaduras) que genera gran cantidad de residuales líquidos que en su inmensa mayoría no reciben el tratamiento adecuado, lo que provoca la emisión de gases a la atmósfera como producto de la degradación de la materia orgánica que contienen estos residuales.(Quintana, 1998).

Al introducirle un flujo constante de bagazo a las calderas provenientes de la mesa alimentadora se reduce el exceso de aire y también la masa de gases de combustión expulsados a la atmósfera así como la composición de los gases de combustión. Esto ocurre ya que se le introduce la misma capacidad de bagazo a las calderas que el estándar, o sea, no existe la expulsión de partículas de bagazo no quemadas.

### **3.3. Conclusiones parciales**

1. El análisis económico se realizó teniendo en cuenta los ingresos por la venta de energía eléctrica al SEN, obteniendo 10 749 771,5022 CUP y un efecto económico total (consumo propio mas venta) equivalente a 35 837 435,0286 CUP.
2. La utilización del bagazo de caña de azúcar como combustible para la generación de energía tiene como principales beneficios la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero contribuyendo así a la mitigación del calentamiento global; además de disminuir la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

## Conclusiones

1. La utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible; en Cuba la biomasa más utilizada como fuente de energía es el bagazo de caña, y mediante los sistemas de cogeneración es aprovechada aún más por su elevado potencial energético.

2. La metodología desarrollada permitió un análisis del comportamiento energético en términos de consumo y generación de la zafra 2020-2021 con respecto a las zafas anteriores (2018-2019 y 2019-2020); siendo significativa la entrega de energía eléctrica al sistema nacional, lo cual se reduce en beneficios desde el punto de vista financiero para la fábrica.

3. El caso de estudio posibilitó conocer que para el central de 153,46 t/hora de molida potencial para una zafra de 120 días y bajo condiciones normales de funcionamiento se pueden obtener ingresos por la venta de energía eléctrica al SEN, ascendente a 10 749 771,5022 CUP y un efecto económico total (consumo propio más venta) equivalente a 35 837 435,0286 CUP.

4. El uso de la biomasa (bagazo) como fuente de energía en la industria azucarera es muy atractiva desde el punto de vista medioambiental, no solamente como reemplazo de los combustibles fósiles, sino también como mejora de los problemas de emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

## **Recomendaciones**

- Utilizar el presente trabajo como documento de consulta para la continuidad de las investigaciones en cuanto a la generación y uso de la energía.
- Continuar la evaluación técnica de la mesa alimentadora y añadirle mejoras para un mejor funcionamiento.
- Proponer un estudio de sistemas de control para la mesa alimentadora de bagazo con el objetivo de monitorear el flujo de alimentación del bagazo a las calderas.

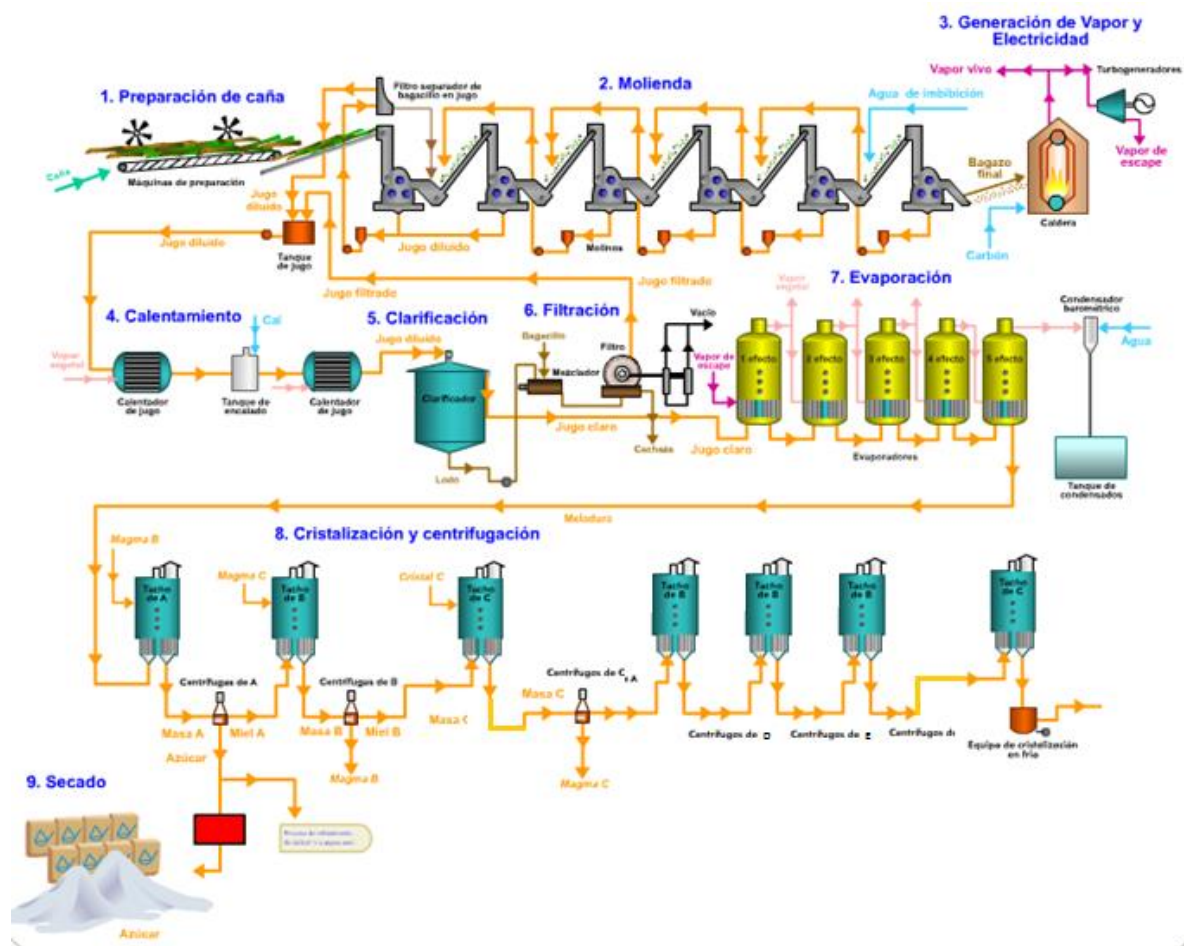
## Referencias Bibliográficas

1. Abstengo, E. (2018). Integración de una planta de ácido cítrico de bagazo de caña al Central Azucarero Uruguay. (Trabajo de Diploma) Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
2. Alcalde, A. (2017). Optimización del consumo de vapor mediante la instalación de calentadores de jugo de caña clarificado en un ingenio azucarero. (Trabajo de Diploma) Universidad Nacional de Trujillo.
3. Anoceto, D. (2017). Alternativa para la exportación de electricidad en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez a partir de la instalación de una bioeléctrica. . (Trabajo de Diploma) Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
4. Faife, R. (2018). Evaluación del desempeño energético de la UEB Central azucarero Heriberto Duquesne, relativo a los requisitos de la norma ISO 50001 (Trabajo de Diploma), Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
5. González, M. (2015). Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar. *Revista Centro Azucar*. Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
6. Gutiérrez, R. (2017). Estudio paramétrico de la UEB Central Azucarero Panchito Gómez Toro como tributario de bagazo de la UEB Central Azucarero Quintín Banderas(Trabja de Diploma), Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas .
7. Hernández, B. (2018). Programa cubano para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera para la generación de electricidad. *Revista ATAC*. La Habana. Cuba
8. Herrera, D. (2017). Proyecto de ejecución de un panel de variador de frecuencia para mejorar la eficiencia de operación de la caldera de vapor del central azucarero "Carlos Baliño" (Trabja de Diploma) Universidad de La Habana.

9. Polanco, H. (2019). Análisis de la sustitución de transportadores de rastrillos por transportadores de banda en el central Uruguay (Trabajo de diploma). Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas .
10. Quintana, C. (1998). Impacto ambiental debido a la combustión de biomasa cañera en la industria azucarera cubana. *Revista Centro Azúcar*.
11. Rios, Y. (2017). Perspectivas de generación eléctrica de la Empresa Azucarera de Villa Clara en el 2030 y vías para su incremento(Trabajo de Diploma) Univercidad Central "Marta Abreu" de Las Villas .
12. Rodriguez, B. (2014). Comparación ambiental de la generación de energía eléctrica a partir del bagazo y fuel oil. (Trabajo de diploma). Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana
13. Rodriguez, L. (2014). Empleo de la relación residuo producto para la estimación de biomasa cañera potencial. (Trabajo de diploma). Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar: Ciudad de La Habana
14. Rodriguez, P. (2010). Potencialidades de generación de eletricidad a partir de biomasa Scientia Et Technica.
15. Rubio, A. (2018). Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad Revista Centro Azucar (Trabajo de diploma). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas .
16. Trujillo, M. (2020). Reactividad a la combustion carbon biomasa en una caldera de generacion de vapor a nivel industrial. (Trabajo de Diploma) Universidad de Holguin.

## Anexos

### Anexo 1 Diagrama de flujo general del proceso de producción de azúcar crudo.



**Anexo 2 Tabla de datos utilizados para el cálculo de los balances de energía.**

|                     |                       |                                                       |          |       |
|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|----------|-------|
| Turbogenerador<br>1 | N<br>(prod.)          | Eficiencia producida                                  | 2 500    | kW-h  |
|                     | Nt                    | Eficiencia termodinámica.                             | 0,64     | -     |
|                     | Ho                    | Trabajo ideal de la máquina                           | 436,74   | kJ/kg |
|                     | Nmec                  | Eficiencia mecánica.                                  | 0,97     | -     |
|                     | Nelec.                | Eficiencia eléctrica.                                 | 0,94     | -     |
|                     | Ntubo                 | Eficiencia por aislamiento del tubo.                  | 0,87     | -     |
|                     | Pv alim               | Presión del vapor alimentado.                         | 1,819    | MPa   |
|                     | Tv alim.              | Temperatura del vapor alimentado                      | 320      | °C    |
|                     | $\lambda_{vs}$        | Calor latente del vapor de salida.                    | 2 510,69 | kJ/kg |
|                     | $\lambda(\text{CAI})$ | Calor latente del vapor en el ciclo adiabático ideal. | 2196,60  | kJ/kg |
| Turbogenerador<br>2 | N<br>(prod.)          | Eficiencia producida                                  | 4 000    | kWh   |
|                     | Pv                    | Presión del vapor producido.                          | 1,819    | MPa   |
|                     | Tv                    | Temperatura del vapor                                 | 320      | °C    |

|          |                |                                          |          |       |
|----------|----------------|------------------------------------------|----------|-------|
| Calderas |                | producido.                               |          |       |
|          | Tg             | Temperatura de los gases de la chimenea. | 180      | °C    |
|          | Ta alim        | Temperatura del agua de alim             | 104      | °C    |
|          | w              | Humedad del bagazo.                      | 49,96    | %     |
|          | $\lambda_{vs}$ | Calor latente del vapor sobrecalentado.  | 3 069,59 | kJ/kg |
|          | m              | Relación de aire empleado.               | 1,5      | -     |
|          | $\alpha$       | Coeficiente de pérdidas.                 | 0,99     | -     |
|          | $\beta$        | Coeficiente de pérdidas.                 | 0,92     | -     |
|          | $\gamma$       | Coeficiente de pérdidas.                 | 0,9      | -     |
|          | x              | Coeficiente de pérdidas.                 | 1,05     | -     |

**Anexo 3 Tabla del comportamiento de parámetros energéticos de la zafra 2018-2019.**

|                  | Consumo<br>* (10 <sup>3</sup> ) kW |       |     | Generación* (10 <sup>3</sup> )<br>kW |          |     |
|------------------|------------------------------------|-------|-----|--------------------------------------|----------|-----|
|                  | Plan                               | Real  | %   | Plan                                 | Real     | %   |
| <b>Noviembre</b> |                                    | 70,3  |     |                                      | 440,4    |     |
| <b>Diciembre</b> | 187,2                              | 122,1 | 65  | 2919,6                               | 3228,6   | 111 |
| <b>Enero</b>     | 187,2                              | 100,6 | 54  | 2919,7                               | 3202,1   | 110 |
| <b>Febrero</b>   | 169,1                              | 141,7 | 84  | 2637,2                               | 2473,4   | 94  |
| <b>Marzo</b>     | 187,2                              | 129,3 | 69  | 2919,7                               | 3278,7   | 112 |
| <b>Abril</b>     | 52,6                               | 193,2 | 367 | 823,5                                | 2180,0   | 265 |
| <b>Mayo</b>      |                                    | 208,2 |     |                                      | 1020,2   |     |
| <b>TOTAL</b>     | 783,3                              | 965,5 | 123 | 12219,7                              | 15823,51 | 129 |

**Anexo 4 Tabla del comportamiento de parámetros energéticos de la zafra 2019-2020.**

|                  | <b>Consumo* (10<sup>3</sup>)</b> |       |     | <b>Generación* (10<sup>3</sup>)</b> |          |     |
|------------------|----------------------------------|-------|-----|-------------------------------------|----------|-----|
|                  | <b>kW</b>                        |       |     | <b>kW</b>                           |          |     |
|                  | Plan                             | Real  | %   | Plan                                | Real     | %   |
| <b>Noviembre</b> |                                  |       |     |                                     |          |     |
| <b>Diciembre</b> | 265,5                            | 103,0 | 39  | 3291,2                              | 3254,3   | 99  |
| <b>Enero</b>     | 265,8                            | 149,0 | 56  | 3295,5                              | 3144,3   | 95  |
| <b>Febrero</b>   | 248,6                            | 143,1 | 58  | 3083,0                              | 2878,5   | 93  |
| <b>Marzo</b>     | 265,8                            | 135,3 | 51  | 3295,5                              | 3168,2   | 96  |
| <b>Abril</b>     | 137,0                            | 256,6 | 187 | 1698,9                              | 2626,2   | 155 |
| <b>Mayo</b>      |                                  | 59,0  |     |                                     | 500,5    |     |
| <b>TOTAL</b>     | 1182,7                           | 845,9 | 72  | 14664,1                             | 15571,94 | 106 |

**Anexo 5 Tabla del comportamiento de parámetros energéticos de la zafra 2020-2021**

|                  | <b>Consumo* (10<sup>3</sup>)</b> |           | <b>%</b> | <b>Generación* (10<sup>3</sup>)</b> |           | <b>%</b> |
|------------------|----------------------------------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|----------|
|                  | <b>kW</b>                        | <b>kW</b> |          | <b>kW</b>                           | <b>kW</b> |          |
|                  | Plan                             | Real      | %        | Plan                                | Real      | %        |
| <b>Noviembre</b> |                                  |           |          |                                     |           |          |
| <b>Diciembre</b> | 320,95                           | 121,74    | 38       | 3979,81                             | 2586,96   | 65       |
| <b>Enero</b>     | 398,65                           | 152,22    | 38       | 4943,31                             | 4898,32   | 99       |
| <b>Febrero</b>   | 360,07                           | 158,40    | 44       | 4464,94                             | 3702,34   | 83       |
| <b>Marzo</b>     | 398,50                           | 204,15    | 51       | 4943,31                             | 3961,25   | 80       |
| <b>Abril</b>     | 172,11                           | 201,8     | 117      | 2134,39                             | 4244,12   | 199      |
| <b>Mayo</b>      |                                  | 121,2     |          |                                     | 1404,5    |          |
| <b>TOTAL</b>     | 1650,28                          | 959,4     | 58       | 20465,8                             | 20797,48  | 102      |

**Anexo 6 Mesa alimentadora de bagazo de la UEB “Ciudad Caracas”.**



**Anexo 7 Generadores eléctricos de la UEB “Ciudad Caracas”.**

**Anexo 8 Hornos de la UEB “Ciudad Caracas”**