

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
CENTRO DE ESTUDIOS ENERGÉTICOS Y TECNOLOGÍAS AMBIENTALES
(CEETA)**

“Año 59 de la Revolución”



TRABAJO DE DIPLOMA

Estudio paramétrico de la UEB Central Azucarero “Panchito Gómez Toro” como tributario de bagazo de la UEB Central Azucarero “Quintín Banderas”

Diplomante: Randy Gutiérrez Toledo

Tutor: Dr. C Oscar M. Cruz Fonticiella

Santa Clara, 2017

*“Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría,
y que obtiene la inteligencia”
(Proverbios 3:13)*

Dedicatoria

“A Dios por darme la vida, a mis padres Juan Ramón y María Isabel por el amor y la educación que siempre me han dado y a mí querida esposa por su amor”

*A todos ellos les dedico este TRABAJO DE
DIPLOMA*

Agradecimientos

- *A Dios por su fidelidad.*
- *A mis padres y a mi hermana, por el amor y cariño que siempre me han brindado.*
- *A todos mis tíos, y toda mi familia por su apoyo.*
- *A mi amada esposa Yanet, gracias por siempre estar ahí.*
- *A mis pastores Lester y Jany Dey por cada palabra de aliento.*
- *A mi querida suegra por toda la ayuda que me ha brindado.*
- *Y a todos mis amigos y compañeros de clase por los momentos que hemos vivido.*
- *A mi tutor Fonty, por guiarme y por brindarme todo el tiempo el apoyo necesario para la realización de esta investigación*

A todos ellos: Muchas Gracias

Resumen

En el siguiente Trabajo de Diploma se realiza el estudio paramétrico de la UEB “Central Azucarero Panchito Gómez Toro” como tributario de bagazo de la UEB “Central Azucarero Quintín Banderas”. Para la obtención de resultados se plantean objetivos específicos que viabilizan el estudio, donde se sistematizan los aspectos conceptuales que sostienen la investigación, caracterizando de esta manera al Central “Panchito Gómez Toro”. Los principales parámetros del central se calculan mediante la ayuda del software EES (*Engineering Equation Solver*) donde se toman las medidas necesarias en correspondencia con los resultados obtenidos.

Abstract

The following Diploma Work the parametric study of the UEB "Central Azucarero Panchito Gómez Toro" as tributary of bagasse of the UEB Central Azucarero "Quintín Banderas". In order to obtain results, specific objectives are proposed that enable the study, which systematizes the conceptual aspects that support the investigation, characterizing the Central "Panchito Gómez Toro". The main parameters of the control unit are calculated using the EES software (Engineering Equation Solver) where the necessary measurements are taken in accordance with the results obtained.

Tabla de contenido

Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Resumen	5
Abstract	5
Introducción.....	8
Capítulo I: Marco teórico conceptual	13
Introducción	13
1.1 Cogeneración	14
1.2 Generadores de vapor	16
1.3 Agroindustria Azucarera: Principal fuente de biomasa en Cuba.	18
1.4 Generadores de vapor. El bagazo como combustible	19
1.4.7 Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera	22
1.5 Manejo de la energía térmica en el proceso de fabricación de azúcar. ..	23
1.6 Conclusiones parciales	24
Capítulo II: Caracterización de la UEB “Panchito Gómez Toro”	25
2.1 Caracterización de la UEB “Panchito Gómez Toro”	25
2.2 Descripciones de las instalaciones tecnológicas	25
2.3 Descripción del proceso de fabricación por etapas.	29
2.4 Descripción del esquema del uso del vapor y los condensados en el central.....	29
2.5 Cálculo de los principales parámetros del central.	34
2.5.1 Balance de masa en motores primarios	35
2.6 Resultados obtenidos	40
2.6.1 Tabla de los resultados obtenidos.....	40
2.7 Conclusiones parciales	42

Capítulo III: Análisis de los resultados.....	43
Introducción	43
3.1 Resultados obtenidos	43
3.2 Análisis de la influencia del agua de imbibición en el ahorro de bagazo. 43	
3.3 Análisis de la influencia de la eficiencia de las calderas de vapor en el ahorro de bagazo.....	44
3.4 Análisis de la influencia de la temperatura del agua de alimentación en el ahorro de bagazo.....	46
3.5 Análisis de la influencia de la temperatura de los gases en el ahorro de bagazo.....	48
3.6 Propuesta de un sistema automático para controlar el flujo de agua de imbibición.....	48
3.6.1 Sistema automatizado.....	49
3.6.2 Programación del sistema automatizado	50
3.7 Conclusiones parciales	51
Conclusiones generales	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía	54
Anexos	56

Introducción

En la actualidad, la energía para usos industriales proviene de varias fuentes: la energía química de las sustancias combustibles, la energía potencial del agua acumulada en embalses, la energía eólica, la energía atómica, la energía solar, la energía de las mareas y otras. Sin embargo, a pesar de existir diversas fuentes, la mayor parte se obtiene a partir de la energía química liberada, en forma de calor por los combustibles (fósiles o renovables) al quemarse estos en las calderas de los generadores de vapor. Es por ello que el correcto diseño de estos equipos, su óptima construcción y su eficiente operación, son de gran importancia para la eficiencia productivas en los lugares que la utilicen.

El uso de los generadores de vapor consta de diferentes concepciones en cuanto a su aplicación, hay autores que plantean que “existe una gran preocupación por el ahorro y uso eficiente de la energía; siendo el generador de vapor uno de los equipos con mayores aplicaciones dentro de la industria, su uso representa un gran consumo de combustible, por lo que el lograr una operación más eficiente de los mismos es de vital importancia” (Noriega, 2011, p. 18).

Las empresas industriales necesitan energía para su funcionamiento, generalmente en su forma primaria, calor, o electricidad. De ahí que siempre se requiera la presencia de generadores de vapor para producir el vapor que suministrará el calor o que generará la energía eléctrica. En aquellos casos en que la industria prescinda de tener sus propios equipos, tendrá que tomar energía eléctrica del sistema nacional. La energía eléctrica del sistema nacional en una buena medida es producida en centrales termoeléctricas con potentes generadores de vapor.

Cuba es un país de limitados recursos energéticos, y en él casi la totalidad del vapor y la electricidad se generan a partir de la energía química de los combustibles. Es por ello que la explotación eficiente de sus equipos de generación de vapor tiene objetivamente una importancia vital.

Es importante conocer que, dentro de la economía del país se cuenta con varios centrales azucareros, los cuales, además de producir azúcar, también se dedican a la producción de la energía eléctrica. De esta energía generada una parte se utiliza para movilizar sus equipos y la otra parte se vende a la red nacional. El principal combustible utilizado para las calderas es el bagazo.

La UEB “Panchito Gómez Toro” es uno de los centrales que suministra energía a la red nacional, y no depende de esta para la realización de sus operaciones. Este a su vez pasará a ser tributario del bagazo sobrante al central UEB “Quintín Banderas” quién se convertirá en bioeléctrica, por lo que se convierte en una de las principales metas a seguir en el central: el ahorro de bagazo.

Existen aspectos pocos investigados en el ahorro de bagazo tales como: la influencia del agua de imbibición así como otros factores. En la literatura revisada (Hugot, 1980) hasta el momento, no se encuentra ningún análisis paramétrico que resalten estas influencias.

Entre otros factores que existen para acumular bagazo está el aumento de la eficiencia de las calderas, y tampoco se encuentra en la literatura revisada (Torres, 2012).

Indiscutiblemente, debe existir una vinculación entre: la temperatura del agua de alimentación a las calderas de vapor, la temperatura de los gases de escape y el bagazo de caña acumulado. Al revisar documentación de ese tema (Silva, 2005) tampoco se encontró que den cuenta de ese vínculo.

Problema científico

El Central Azucarero UEB “Panchito Gómez Toro” al ser tributario de bagazo del Central Azucarero UEB “Quintín Banderas” se encuentra en la necesidad de ahorrar la mayor cantidad de bagazo posible.

Con el propósito de solucionar el problema científico del trabajo se plantea la siguiente **hipótesis**:

- Es posible que en el Central Azucarero UEB “Panchito Gómez Toro” se pueda ahorrar bagazo para tributar a la UEB Central Azucarero “Quintín Banderas” sin ver afectados sus niveles de producción.

En correspondencia, la investigación declara el ahorro de bagazo en el escenario de Centrales Azucareros como **objeto de investigación**, para lo cual se trazan los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Efectuar un estudio paramétrico de la UEB “Central Azucarero Panchito Gómez Toro” en vista al ahorro de bagazo, el cual será tributario de bagazo de la UEB “Central Azucarero Quintín Banderas”.

Objetivos específicos

1. Enunciar los referentes teóricos que sustentan el marco de la investigación.
2. Caracterizar los aspectos fundamentales de la “UEB Central Panchito Gómez Toro”.
3. Calcular los principales parámetros del central con ayuda del software EES (*Engineering Equation Solver*).
4. Analizar los resultados obtenidos por EES en función de ahorrar bagazo.

Justificación de la investigación

La UEB Central “Panchito Gómez Toro”, representa uno de los centrales de mayor producción en Villa Clara, vanguardia entre los ocho homólogos de la Provincia, y es tercera del país según los parámetros de eficiencia agroindustrial.

La virtud principal de este ingenio lo representa su cumplimiento en las molidas, la corrección de deficiencias, la limpieza del área de trabajo, la

atención al hombre, y sus niveles de producción. Por lo cual se hace necesario un análisis de los principales parámetros del central en virtud de tomar medidas que contribuyan al ahorro de bagazo.

Mediante la investigación serán beneficiados ambos centrales, la UEB “Panchito Gómez Toro”, en cuanto al ahorro de bagazo y la UEB “Quintín Banderas”, en el aumento de la producción de energía a partir del bagazo tributado de la UEB “Panchito Gómez Toro”.

La novedad del presente trabajo radica en la necesidad que suple para el central UEB “Quintín Banderas”, en el análisis expuesto sobre los resultados arrojados por EES, y en la proyección futura del ahorro de bagazo mediante los resultados de la investigación.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se enumeran las correspondientes **tareas de investigación**:

1. Sistematizar los referentes teóricos metodológicos que sustentan la investigación
2. Identificar las herramientas a utilizar para el logro de la investigación
3. Describir las características fundamentales de la “UEB Central Panchito Gómez Toro”.
4. Calcular mediante la utilización software EES los parámetros necesarios en la pesquisa para llevar a cabo el análisis.
5. Examinar los resultados para el arribo de conclusiones y recomendaciones

Estructura capitular de la investigación

La presente investigación se estructura por capítulos, organizados de manera racional según los objetivos planteados con anterioridad. El primer capítulo expone una fundamentación conceptual que sirve de base para la investigación, abordando temas tales como: generadores de vapor,

cogeneración, el bagazo como fuente de combustible principal de los centrales azucareros; permitiendo así una comprensión amplia del tema.

El segundo capítulo caracterizará los aspectos que distinguen al central UEB “Panchito Gómez Toro”, la descripción de las instalaciones tecnológicas así como la del esquema del uso del vapor del central. También se muestran los principales datos del central, necesarios para el cálculo de los parámetros fundamentales utilizando el EES. Se realizan además los cálculos de los principales parámetros del central.

En el capítulo tres se realiza el análisis de los resultados obtenidos mediante la utilización de gráficos para una mejor comprensión, tomando de esta manera las medidas necesarias.

Se presentan conclusiones y recomendaciones en correspondencia con el problema y los objetivos planteados. También se expone la bibliografía que sustenta el estudio, y se incluyen un conjunto de anexos que complementan la investigación.

Capítulo I: Marco teórico conceptual

Introducción

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

Desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes energéticas más intensivas (con un mayor poder calorífico), y el uso de la biomasa fue bajando hasta mínimos históricos que coincidieron con el uso masivo de los derivados del petróleo y con unos precios bajos de estos productos.

A pesar de ello, la biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción del futuro (Biomasa, 2009, p. 1).

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 (Torres, 2012, p. 1).

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 medio de trabajo, no solo mejora su eficiencia y eficacia, sino que perfecciona el resultado esperado en el orden administrativo.

En el siguiente capítulo se abordarán aspectos teóricos y se plantearán las bases conceptuales de la investigación. Se enunciarán términos como cogeneración, generadores de vapor, el bagazo como combustible entre otros. De esta manera se confeccionará el fundamento de la investigación y de las soluciones que la misma proporciona.

1.1 Cogeneración

La cogeneración se define como la producción secuencial de energía eléctrica y/o mecánica y de energía térmica aprovechable en los procesos industriales a partir de una misma fuente de energía primaria, y es hoy, una alternativa como método de conservación de energía para la industria acorde con las políticas de globalización económica regional y a la política internacional orientada a lograr un desarrollo sostenible. La mayoría de los procesos industriales y

aplicaciones comerciales, requieren de vapor y calor a baja temperatura. Así ellos pueden combinar la producción de electricidad y calor para los procesos, aprovechando la energía que de otra forma se desecharía, como ocurre en las centrales termoeléctricas convencionales; a esta forma de aprovechar el calor de desecho se le conoce como cogeneración (Estupiñan, 2013, p. 12) .

1.1.1 Ventajas 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 (Fraile, 2010, p. 20).

Las ventajas y beneficios de la cogeneración son las siguientes: (Fraile, 2007, p. 12)

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 CO₂ 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. (Fraile, 2010)

Los ingenios azucareros producen su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. A través del tiempo iniciaron realmente la cogeneración de energía eléctrica, ya que con los años se realizó el convenio de venta del excedente de energía a la Empresa Eléctrica de Cuba.

Para el proceso de cogeneración, los ingenios agroindustriales cuentan con generadores de vapor (calderas), en las cuales se utiliza el bagazo de caña, principalmente como combustible para la producción de vapor.

1.2 Generadores de vapor

Se llama así al conjunto o sistema formado por una caldera y sus accesorios.

Una caldera es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica. (Bahamondes, 2011, p. 4)

Se plantea que “es un recipiente cerrado donde se suministra agua, combustible, aire o calor residual, con el fin de producir vapor” (Marcano, 2013, p. 2).

“El objetivo principal de la generación de vapor es producir vapor a una presión mayor a la atmosférica, de manera de aprovechar la energía que posee en tales condiciones y cubrir las necesidades de la fábrica. El calor necesario para evaporar el agua proviene de la energía liberada en el proceso de oxidación de un combustible. Dicha liberación de energía se manifiesta en forma de calor (calor de combustión)”, (Golato, 2011, p. 1).

1.2.1 Características de los generadores de vapor

Los generadores de vapor modernos se fabrican en una amplia gama de tipos y capacidades; los hay desde pequeñas unidades con producciones de 0,3 t/h y presiones menores que 1 MPa, hasta gigantescas instalaciones de 4 000 t/h de producción y presiones del orden de los 26 MPa.

En cuanto a la temperatura van desde simples unidades de vapor saturado, hasta generadores de vapor sobrecalentado a 570 °C. Dada la diversidad de tipos, amplia gama de capacidades, y complejidad técnica, para su correcta explotación se requiere un estudio profundo de su funcionamiento, de los métodos de cálculo y de los procesos que tienen lugar en ellos. El generador de vapor moderno es un equipo de gran complejidad. Es un intercambiador de calor altamente especializado, en el cual se transfiere al agua el calor desprendido por el combustible para formar el vapor. Lo componen diversos equipos con diferentes funciones, pero todos contribuyen a garantizar su funcionamiento y aumentar su eficiencia térmica (Rubio, 2015, p. 1).

El incremento de la eficiencia en el generador de vapor es una necesidad de los procesos energéticos, pues los mismos en la actualidad presentan valores muy bajos, baste decir que de la energía del combustible al degradarse y una parte perderse por ineficiencia en los generadores de vapor, las turbinas, los generadores eléctricos, las líneas de transmisión, los transformadores, los motores eléctricos y los equipos mecánicos, el hombre sólo puede convertir en trabajo útil entre un 12 y un 36 %, lo que significa que la mayor parte de ella se pierde (Rubio, 2015, p. 2).

1.3 Agroindustria Azucarera: Principal fuente de biomasa en Cuba.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa proveniente de la agroindustria azucarera, pues la caña de azúcar además de ser uno de los principales cultivos del país, es el captador vivo más eficiente de la energía solar por lo que se van a determinar altos rendimientos agrícolas que se pueden obtener como cultivo anual (Alonso, 2008, p. 1).

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Tomando en cuenta sólo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacena alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que pueda producirse (Reyes, 2003, p. 1).

Una de las mayores ventajas de la biomasa cañera es que se trata de un portador energético renovable, compatible con el medio ambiente y de rápida reposición. En el transcurso de un año, con la atención adecuada, es posible disponer de una planta con fibras suficiente para generar cantidades similares de biomasa, el ciclo de la utilización de la biomasa es cerrado.

La biomasa aprovechable energéticamente es el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de este proceso, se obtiene con un 50% de humedad, esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13,5 t de bagazo equivalentes a 2,7 tce (toneladas de combustible equivalentes 37.5 MJ/kg), (Reyes, 2003, p. 17).

El bagazo constituye el mayor subproducto de la industria azucarera, es el residuo del proceso de fabricación de azúcar a partir de la caña, el remanente de los tallos después de ser extraído el jugo azucarado que esta contiene, por los molinos del central (Almenares, 2009, p. 9).

El bagazo de caña de azúcar constituye uno de los principales recursos cuyo aprovechamiento integral y eficiente ofrece perspectiva para el desarrollo del país, para un rendimiento de 60 t/ha. En las condiciones de Cuba, para producir 1 tonelada de azúcar es necesario moler unas 8,5 toneladas de caña las cuales producen unas 2,2 toneladas de bagazo) con una humedad que

oscila entre 48 y el 50 % y una cantidad considerable de residuos agrícolas cañeros (RAC).

El bagazo como combustible es poco eficiente por su alto contenido de humedad, pero en Cuba es la principal biomasa, dada la gran cantidad que se produce anualmente durante el periodo de zafra. Desde el punto de vista del aprovechamiento energético del bagazo, su uso integral y eficiente en una zafra permite obtener el equivalente de 400 kg de fuel oíl por cada tonelada de azúcar producida (Biomasa, 2009, p. 1)

1.4 Generadores de vapor. El bagazo como combustible

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 de operación para calderas, por ejemplo, 2.1 y 4.1 MPa. En el caso de calderas con una 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 condensación y de escape de vapor.

1.4.1 Caracterización del bagazo como combustible

El bagazo ha sido utilizado históricamente como combustible en la industria azucarera, y aún 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 (Torres, 2012, p. 2).

1.4.2 Composición física del bagazo

La composición física del bagazo (Tabla 1.1) 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 1.1: Composición física del bagazo.

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

Fuente: (Gómez, 2009, p. 27)

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 (Gómez, 2009, p. 28).

1.4.3 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 1.2 se presenta la composición química elemental del bagazo.

Tabla 1.2: Composición química del bagazo

Elementos químicos	Bagazo (%)
Carbono	47,00
Hidrógeno	6,50
Oxígeno	44,00
Cenizas	2,50

Fuente: (Reyes, 2003, p. 1)

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.

1.4.4 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 molid.

1.4.5 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 % (Hugot, 1980, p. 22).

1.4.6 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.

1.4.7 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 m³ 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 (Reyes, 2003, p. 2).

1.5 Manejo de la energía térmica en el proceso de fabricación de azúcar.

La producción de azúcar de caña, ha sido a lo largo de muchos años uno de los más importantes renglones de la economía, tiene la prioridad única, entre las grandes industrias, de obtener de la materia prima el combustible necesario para suministrar la energía que requiere el proceso y un exceso que se destina a consumidores externos. Esta alternativa ha sido explotada con muy poca intensidad manteniéndose un bajo aprovechamiento de las reservas energéticas que posee la caña, por lo que representa un pilar fundamental en el desarrollo económico del país.

Es de vital importancia la proyección de ciclos termodinámicos más eficientes que los aplicados, para esto resulta una prioridad la construcción en los centrales azucareros de instalaciones adecuadas de generación eléctrica que independientemente de que no estén a la altura de los sistemas convencionales, tengan como ventaja que sean rentables con superioridad en los índices de generación que conduzcan al desarrollo de la eficiencia económica, con su propio combustible.

Las tareas a ejecutar para garantizar la modernización de los ciclos termodinámicos eficientes están dadas por el uso de residuos cañeros (RAC) como combustible, la generación de energía eléctrica todo el año, la racionalización de los consumos propios de energía eléctrica contrarrestando el sobredimensionamiento, la sustitución de equipos de transferencias de calor

por otros que garanticen la disminución de los consumos de vapor de escape en el proceso, y el aumento de la eficiencia de la planta de generación de vapor, etcétera.

Es una realidad el bajo aprovechamiento que se le ha dado al recurso energético que aporta la caña de azúcar, históricamente los ingenios azucareros han producido vapor y energía eléctrica usando el bagazo como combustible en la caldera. Con la utilización del bagazo se genera energía barata, ya que constituye una fuente permanente de combustible orgánico de bajo costo, además se ha demostrado que un esquema con óptimo aprovechamiento del vapor permite lograr sobrantes de bagazo del orden del 20–25% (Silva, 2005, p. 15).

1.6 Conclusiones parciales

En el capítulo abordado se enunciaron los referentes teóricos que sustentan el marco de la investigación, donde no se encontraron literaturas que referenciaran la influencia de diferentes factores tales como: el agua de imbibición, la eficiencia de las calderas, la temperatura del agua de alimentación y la temperatura de los gases de escape, en relación con el ahorro de bagazo. De acuerdo con estos resultados se puede afirmar que el ahorro de bagazo a partir de diferentes factores existentes en los centrales azucareros, es un nuevo tema a investigar.

Capítulo II: Caracterización de la UEB “Panchito Gómez Toro”

2.1 Caracterización de la UEB “Panchito Gómez Toro”

La UEB “Panchito Gómez Toro”, se encuentra ubicada en el Municipio de Quemado de Güines, perteneciente a la provincia de Villa Clara, en los 319 y 335 grados de latitud sur y los 561 y 585 grados de longitud este, limita por el norte con la empresa de cultivos varios y el Batey José René Riquelme del municipio de Quemado de Güines, al sur con la empresa pecuaria Cascajal y la Empresa Azucarera “Carlos Baliño”, ambos del municipio Santo Domingo, al este con la presa Alacranes y al oeste con la Empresa Azucarera “Quintín Banderas” del municipio Corralillo. Perteneciente a la Empresa Azucarera Villa Clara del grupo AZCUBA, cuenta con una extensión cañera sobre suelos arcillosos con buenas características para el cultivo de la caña. Sus áreas están compactadas formando un macizo cañero alrededor del central con un radio aproximado de 12 km. Tiene una capacidad de molida de 3 795 t en 24 horas, es totalmente eléctrico y se procesa caña de corte mecanizado en su totalidad por ferrocarril y por transporte automotor.

La fábrica está estructurada en diferentes áreas de trabajo: Área de fabricación, área de basculador y tándem, área de generación de vapor, área de la planta eléctrica, área de laboratorio, área de mantenimiento integral, además del taller, instrumentación y centro acopio. Todas están estrechamente vinculadas a fin de garantizar la correcta operación del proceso, el control de los parámetros y el correcto y estable funcionamiento de los equipos de la industria.

2.2 Descripciones de las instalaciones tecnológicas

2.2.1 Molida de caña

La Industria cuenta con una norma potencial de 3 795 t caña día (334 719 @ día), en la actualidad, pudiendo lograr con el equipamiento existente en molinos una norma potencial de: 5 114 t caña día (450 000 @ día). (Datos del central)

2.2.2 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 molido. También existen cinco molinos de 7 pies (2,13 m) de longitud de mazas donde se muele la caña (Fig. 2.1).

Los equipos instalados en los molinos son motores eléctricos:

Tabla 2.1 Parámetros de los motores instalados en los molinos

Motores eléctricos	Potencia (kW)	Velocidad (s^{-1})
Molino 1 y 5	500	900
Molino 2,3,4	320	900



Fig. 2.1 Tándem de molinos del central.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Área de calderas

Esta área posee tres 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 (Fig. 2.2), 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 (Anexo 1).

Este central posee instalaciones en calderas con índices de generación de 2.38 t vapor por t bagazo y un índice de generación de 38.76 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 (Datos del central).



Fig. 2.2 Generadores de vapor de 25 t/h a una presión de 1,8 MPa y 320 °C de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Planta eléctrica.

La planta eléctrica está compuesta de dos turbogeneradores uno de 4 MW y otro de 2.5 MW (Fig. 2.3).

Tabla 2.1: Parámetros de los turbogeneradores.

Parámetros	Turbo de 4 MW	Turbo de 2.5 MW
Presión de vapor directo	1.8 MPa	1.8 MPa
Presión de vapor de escape	0.1 MPa	0.1 MPa
Consumo de vapor	42 t/h	28 t/h
Consumo de vapor por MW	10.5 t/MW	11.2 t/MW

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/tcm y de entrega de 11.0 kWh/tcm.



Fig. 2.3 Turbogeneradores de la planta eléctrica del central.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Descripción del proceso de fabricación por etapas.

Para llevar a cabo la producción de azúcar crudo de caña son necesarias las siguientes operaciones básicas:

- Preparación de la caña
- Extracción del jugo
- Generación de vapor
- Tratamiento interno del agua
- Purificación de los jugos
- Evaporación de los jugos
- Cristalización y cocción
- Centrifugación

2.4 Descripción del esquema del uso del vapor y los condensados en el central.

A continuación, se muestra el siguiente esquema que refleja el uso del vapor y los condensados en el central UEB “Pachito Gómez Toro”.

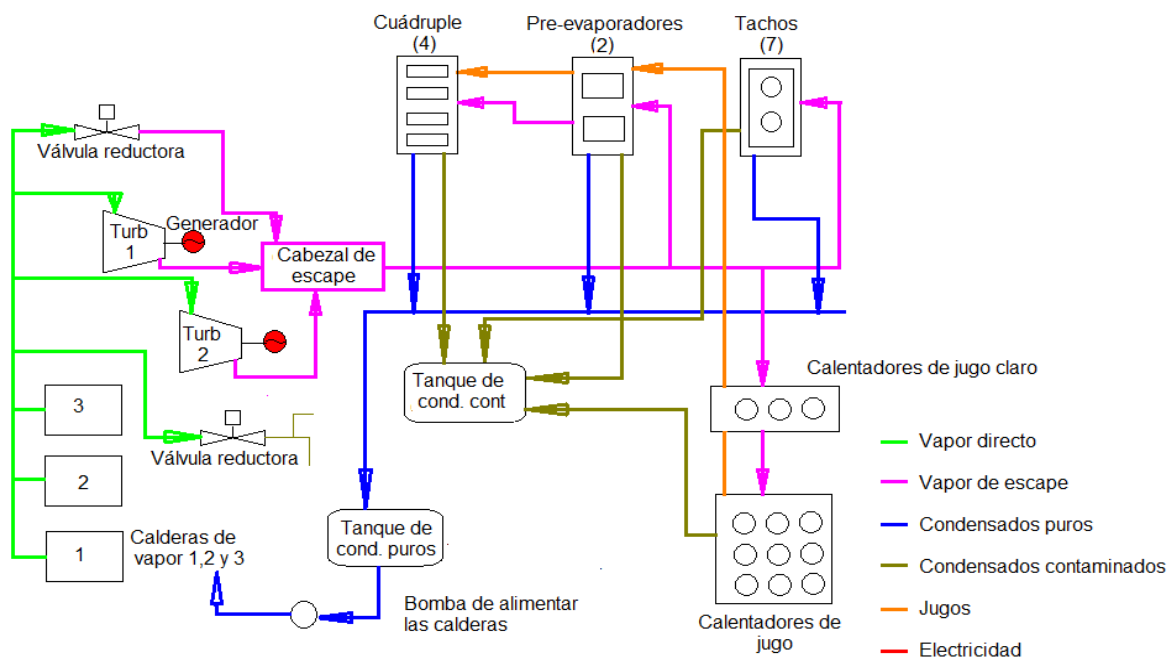


Fig. 2.4 Esquema del uso del vapor y los condensados.

Los cálculos se realizaron en las áreas de generación de vapor y consumo de vapor, para ello se emplearon los datos que se muestran en la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2 Datos del central utilizados para el cálculo de los parámetros.

Fuente: Evaluación energética del central, Claudia Pérez FQF UCLV, 2016

Etapas	Datos	Nombre	Valor	UM
Mezclado y alcalización	$\rho(\text{CaO})$	Densidad del CaO.	1,045	kg/l
Calentador primario 1	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,135	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	42	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	58	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 231.79	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador primario 2	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,135	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	58	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	75	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 231.79	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador rectificador 1	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,179	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	75	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	92	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 208.02	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 2.2 Continuación

Calentador rectificador 2	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,179	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	92	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	104	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 208.02	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador de jugo claro	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,204	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	95	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	111	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 196.64	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Pre-evaporador	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,204	MPa
	Pc	Presión del cuerpo.	0,179	MPa
	t _{jc}	Temperatura del jugo claro.	112	°C
	Bx _i	Concentración del jugo de entrada.	14	°Bx
	Bx _f	Concentración del jugo de salida	17,5	°Bx
	λ_c	Calor latente del vapor en el cuerpo.	2 208.02	kJ/kg
	λ_v	Calor latente del vapor alimentado.	2 196.64	kJ/kg
Evaporador	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,169	MPa
	Pc	Presión del cuerpo.	0,135	MPa
	t _{jc}	Temperatura del jugo claro.	112	°C
	Bx _i	Brix de entrada al 1er evaporador.	14	°Bx
	Bx _f	Brix de la meladura a la salida.	17,5	°Bx
	λ_c	Calor latente del vapor en el cuerpo.	2 208.02	kJ/kg
	λ_v	Calor latente del vapor alimentado.	2 196.64	kJ/kg
	t _{eb.}	Temperatura de ebullición del 1er efecto.	115	°C
	n	Número de efectos.	4	-
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 2.2 Continuación

Turbogenerador 1	N (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
	λ_{ve}	Calor latente del vapor alimentado.	3 069.59	kJ/kg
	Pv sal.	Presión del vapor de salida.	0,204	MPa
	Tv sal.	Temperatura del vapor de salida.	125	°C
	λ_{vs}	Calor latente del vapor de salida.	2 510.69	kJ/kg
	$\lambda(CAI)$	Calor latente del vapor en el ciclo adiabático ideal.	2 196.60	kJ/kg
Turbogenerador 2	N (prod.)	Eficiencia producida	4 000	kWh
Calderas	Pv	Presión del vapor producido.	1,819	MPa
	Tv	Temperatura del vapor producido.	320	°C
	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	%
	λ_{vs}	Calor latente del vapor sobrecalentado.	3 069.59	kJ/kg
	m	Relación de aire empleado.	1,5	-
	α	Coeficiente de pérdidas.	0,99	-
	β	Coeficiente de pérdidas.	0,92	-
	γ	Coeficiente de pérdidas.	0,9	-
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 2.3 Datos de los tachos.

Fuente: Evaluación energética del central, Claudia Pérez, 2016

Tacho de MCA 1	Peso específico.	γ	1 450	kg/m ³
	Volumen del pie de templa.	V_i	10,9	m ³
	Volumen final.	V_f	21,24	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	92,66	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	56,95	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	2,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	92,86	°Bx
Tacho de MCA 2	Volumen del pie de templa.	V_i	10,9	m ³
	Volumen final.	V_f	21,24	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	92,26	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	56,96	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	2,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	93,06	°Bx

Tabla 2.3 Continuación

Tacho de MCB 1	Volumen del pie de templa.	V_i	19,52	m ³
	Volumen final.	V_f	33,04	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	88,80	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	71,88	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	94,8	°Bx
Tacho de MCB 2	Volumen del pie de templa.	V_i	19,52	m ³
	Volumen final.	V_f	33,04	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	89,34	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	71,94	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	94,1	°Bx

Tabla 2.3 Continuación

Tacho de MCC 1	Volumen del pie de templa.	V_i	14,22	m^3
	Volumen final.	V_f	42,28	m^3
	Concentración del pie de templa.	Bx_1	88,80	$^{\circ}Bx$
	Concentración del material alimentado.	Bx_2	62,62	$^{\circ}Bx$
	Tiempo de cocción.	t	4,5	h
	Concentración final.	Bx_3	96,00	$^{\circ}Bx$
Tacho de MCC 2	Volumen del pie de templa.	V_i	14,22	m^3
	Volumen final.	V_f	42,28	m^3
	Concentración del pie de templa.	Bx_1	89,34	$^{\circ}Bx$
	Concentración del material alimentado.	Bx_2	62,70	$^{\circ}Bx$
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	Bx_3	95,9	$^{\circ}Bx$

2.5 Cálculo de los principales parámetros del central.

Los cálculos se realizarán mediante la ayuda del software de computación EES (*Engineering Equation Solver*).

El EES es un programa general de resolución de ecuaciones que puede resolver numéricamente miles de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales acopladas. El programa también puede utilizarse para resolver ecuaciones diferenciales e integrales, hacer optimización, proporcionar análisis de incertidumbre, realizar regresiones lineales y no lineales, convertir unidades, verificar la coherencia de la unidad y generar parcelas de calidad de publicación. Una característica importante de EES es la base de datos de propiedades termodinámicas y de transporte de alta precisión que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que permite su uso con la capacidad de resolución de ecuaciones.

2.5.1 Balance de masa en motores primarios

Consumo de vapor de los motores primarios (Turbogeneradores)

$$G_{\text{turb},1} = \frac{\text{Pot}_{\text{TV},1} \cdot 3600}{(i_{0,\text{SI}} - i_{2,\text{SI}}) \cdot \eta_{\text{TV}} \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{tub}} \cdot \eta_{\text{elec}} \cdot t_{\text{ch}}} \text{ kgv/tc} \quad (2.1)$$

$$G_{\text{turb},2} = \frac{\text{Pot}_{\text{TV},2} \cdot 3600}{(i_{0,\text{SI}} - i_{2,\text{SI}}) \cdot \eta_{\text{TV}} \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{tub}} \cdot \eta_{\text{elec}} \cdot t_{\text{ch}}} \text{ kgv/tc} \quad (2.2)$$

$$G_{\text{turb},1,\text{kg},\text{s}} = G_{\text{turb},1} \cdot \frac{t_{\text{ch}}}{3600} \text{ kgv/s} \quad (2.3)$$

$$G_{\text{turb},2,\text{kg},\text{s}} = G_{\text{turb},2} \cdot \frac{t_{\text{ch}}}{3600} \text{ kgv/s} \quad (2.4)$$

$$G_{\text{turb,tot,h}} = (G_{\text{turb},1,\text{kg},\text{s}} + G_{\text{turb},2,\text{kg},\text{s}}) \cdot 3600 \text{ kgv/h} \quad (2.5)$$

Balance de materiales

Jugo mesclado

$$\text{JM} = (\text{CANA} + \text{AGUA} - \text{BAGAZO}) \cdot 1.18 \text{ kg/h, } 1.18 \text{ es un factor que tiene en cuenta el jugo filtrado} \quad (2.6)$$

$$\text{porc}_{\text{JM}} = \frac{\text{JM}}{\text{CANA}} \cdot 100 \text{ fracc} \quad (2.7)$$

$$\text{JUG}_{\text{ALCZ}} = \text{JM} + \text{CAL} \text{ kg/h} \quad (2.8)$$

Capacidad térmica específica del jugo.

$$c_{p,\text{jg},\text{cal},\text{SI}} = c_{p,\text{jg},\text{cal}} \cdot 4.19 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \quad (2.9)$$

$$c_{p,\text{jg},\text{cal}} = 1 - 0.0056 \cdot Bx_{\text{jg},\text{cal}} \text{ kcal/(kg} \cdot \text{K)} \quad (2.10)$$

Consumo de vapor de escape en calentadores de jugo

$$G_{cal,1} = JUG_{ALCZ} \cdot c_{p,jg,cal,SI} \cdot \left[\frac{t_{fin,1} - t_{inc,1}}{h_{fg,SI} \cdot tc_h} \right] \cdot 1.05 \text{ kgv/tc} \quad (2.11)$$

$$G_{cal,2} = JC \cdot c_{p,jg,cal,SI} \cdot \left[\frac{t_{fin,2} - t_{inc,2}}{h_{fg,SI} \cdot tc_h} \right] \cdot Factor_X \text{ kgv/tc} \quad (2.12)$$

Calor latente de vaporización de jugo

$$\tau_1 = \frac{\tau_{1,SI}}{4.19} \text{ kcal/kg} \quad (2.13)$$

$$\tau_{1,SI} = 2492.9 - 2.0523 \cdot t_{v,jg} - 0.003052 \cdot t_{v,jg}^2 \text{ kJ/kg} \quad (2.14)$$

Calor latente de condensación del vapor de escape

$$\tau_{vap} = \frac{\tau_{vap,SI}}{4.19} \text{ kcal/kg} \quad (2.15)$$

$$\tau_{vap,SI} = 2492.9 - 2.0523 \cdot t_{ve} - 0.003052 \cdot t_{ve}^2 \text{ kJ/kg} \quad (2.16)$$

Consumo de vapor pre-evaporador

$$G_{pre,evap} = \left[W \cdot \frac{\tau_1}{\tau_{vap}} + JC \cdot c_{p,jg,pre,ev} \cdot \left(\frac{t_{ebull} - t_o}{\tau_{vap}} \right) \right] \cdot \frac{Factor_X}{tc_h} \text{ kgv/tc} \quad (2.17)$$

$$G_{pre,evap,h} = G_{pre,evap} \cdot tc_h \text{ kgv/h} \quad (2.18)$$

Tachos

Masa cocida A (2 tachos)

Consumo de vapor en tachos, kg/h

MC A1

$$D_{\text{tacho},A,1} = \left[\frac{W_{\text{inc},A,1} + W_{\text{mat},A,1}}{\tau_{\text{cocc},A,1}} \right] \cdot \text{coef}_{\text{MC},A,1} \text{ kg} \quad (2.19)$$

$$W_{\text{inc},A,1} = P_{\text{ie},\text{inc},A,1} \cdot \left[1 - \frac{B_{x1tA,1}}{B_{x3A,1}} \right] \text{ kg agua evaporada inicial del material} \quad (2.20)$$

$$W_{\text{mat},A,1} = P_{\text{mat},A,1} \cdot \left[1 - \frac{B_{x2tA,1}}{B_{x3A,1}} \right] \text{ kg} \quad (2.21)$$

$$P_{\text{ie},\text{inc},A,1} = \gamma_{A,1} \cdot V_{\text{inc},A,1} \text{ kg, masa material inicial} \quad (2.22)$$

$$P_{\text{fin},A,1} = \gamma_{A,1} \cdot V_{\text{fin},A,1} \text{ kg, masa material final} \quad (2.23)$$

$$P_{\text{mat},A,1} = (P_{\text{fin},A,1} - P_{\text{ie},\text{inc},A,1} - W_{\text{inc},A,1}) \cdot \frac{B_{x3A,1}}{B_{x2tA,1}} \text{ kg, material alimentado} \quad (2.24)$$

Las masas cocidas: A2, B1, B2, C1 y C2 se realizan de la misma manera utilizando los datos correspondientes ya antes visto en la tabla 2.3.

$$G_{\text{tachos}} = \frac{D_{\text{tacho},A,1} + D_{\text{tacho},A,2} + D_{\text{tacho},B,1} + D_{\text{tacho},B,2} + D_{\text{tacho},C,1} + D_{\text{tacho},C,2}}{t_{\text{ch}}} \quad (2.25)$$

Total de consumo de los equipos tecnológicos

$$G_{\text{tecn}} = G_{\text{cal}} + G_{\text{pre, evap}} + G_{\text{tachos}} \text{ kgv/tc} \quad (2.26)$$

Cálculo del consumo de la válvula reductora

$$G_{\text{VR}} = G_{\text{tecn}} - G_{\text{mp}} \text{ kgv/tc} \quad (2.27)$$

Cálculo de Otros

$$G_{\text{otros}} = 0.05 \cdot G_{\text{mp}} + G_{\text{eyec}} \text{ kgv/tc} \quad (2.28)$$

$$G_{eyec} = 0 \text{ kgv/tc} \quad (2.29)$$

Generadores de vapor, consumo de vapor en calderas

$$G_{cald} = (G_{mp} + G_{VR} + G_{otros}) \cdot 1.05 \text{ kgv/tc} \quad (2.30)$$

Cálculo del % inyección directa a escape

$$Porc_{inyecc} = \frac{G_{VR}}{G_{cald}} \cdot 100 \% \quad (2.31)$$

Balance en generadores de vapor

Valor calórico neto del bagazo

$$VCN = \frac{VCN_{SI}}{4.19} \text{ kcal/kg}_{bag} \quad (2.32)$$

$$VCN_{SI} = (4\,250 - 4\,850 \cdot \omega) \cdot 4.19 \text{ kJ/kg}_{bag} \quad (2.33)$$

Pérdidas de calor en gases de escape

$$Q_{p,SI} = \left[t_g \cdot (1 - \omega) \cdot \left(1.4 + m + \frac{0.5}{1 - \omega} - 0.12 \right) \right] \cdot 4.19 \text{ kJ/kg}_{bag} \quad (2.34)$$

Calor recuperado en el vapor

$$Q_{vapor} = (4\,250 - 4\,850 \cdot \omega - Q_p) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \eta \cdot 4.19 \text{ kJ/kg}_{bag} \quad (2.35)$$

Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua

$$Q_n = \frac{Q_{n,SI}}{4.19} \text{ kcal/kgv} \quad (2.36)$$

$$Q_{n,SI} = i_{0,SI} - i_{aa,SI} \text{ kJ/kgv} \quad (2.37)$$

$$\dot{m}_v = \frac{Pot_{TV,1} + Pot_{TV,2}}{(i_{0,SI} - i_{2,SI}) \cdot \eta_{TV} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{tub} \cdot \eta_{elec}} \text{ kg/s} \quad (2.38)$$

$$\dot{m}_{v,th} = \dot{m}_v \cdot \frac{3600}{1000} \text{ t}_v/h \quad (2.39)$$

Índice de generación

$$E = \frac{Q_{vapor}}{Q_{n,SI}} \text{ kgv/kgbag} \quad (2.40)$$

Cálculo del bagazo

Bagazo combustible según molida

$$B_c = \text{BAGAZO} - \text{ME} \text{ kgbag/h} \quad (2.41)$$

$$\text{ME} = 0.02 \cdot \text{CANA} \text{ kg/h} \quad (2.42)$$

Sobrante de vapor y de bagazo

$$\text{SB} = \text{SV} \cdot \frac{t_{ch}}{E} \text{ kgbag/h} \quad (2.43)$$

$$\text{SV} = \text{VAPOR} - G_{cald} \text{ kgv/tc} \quad (2.44)$$

$$\text{VAPOR} = B_c \cdot \frac{E}{t_{ch}} \text{ kgv/tc} \quad (2.45)$$

Bagazo acumulado

$$\text{Bag}_{ACUMUL} = \text{SB} \cdot \text{ND} \cdot 24 \cdot \frac{\text{FC}}{1000} \text{ t}_{bag} \quad (2.46)$$

$$\text{ND} = 150 \text{ días de zafra}$$

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

Masa de bagazo quemado

$$B_q = B_c - \text{SB} \text{ kgbag/h} \quad (2.47)$$

$$\text{kg}_{bag,quem,t_c} = \frac{B_q}{t_{ch}} \text{ kgbag/ t}_c \quad (2.48)$$

Eficiencia en calderas

$$\eta_{\text{cald}} = G_{\text{cald}} \cdot \frac{Q_{n,\text{SI}}}{\text{kg}_{\text{bag,quem,tc}} \cdot \text{VCN}_{\text{SI}}} \cdot 100 \quad (2.49)$$

Balance en condensados

$$G_{\text{cond}} = G_{\text{pre,evap}} + G_{\text{tachos}} \quad \text{kgv/tc} \quad (2.50)$$

Balance térmico

$$Q_{\text{mp}} = G_{\text{mp}} \cdot (i_{0,\text{SI}} - i_{2,\text{SI}}) \quad \text{kJ/tc} \quad (2.51)$$

$$Q_{\text{cal}} = G_{\text{cal}} \cdot (i_{2,\text{SI}} - i_{\text{aa,SI}}) \quad \text{kJ/tc} \quad (2.52)$$

$$Q_{\text{pre,evap}} = G_{\text{pre,evap}} \cdot (i_{2,\text{SI}} - i_{\text{aa,SI}}) \quad \text{kJ/tc} \quad (2.53)$$

$$Q_{\text{tachos}} = G_{\text{tachos}} \cdot (i_{2,\text{SI}} - i_{\text{aa,SI}}) \quad \text{kJ/tc} \quad (2.54)$$

$$Q_{\text{cald}} = G_{\text{cald}} \cdot (i_{0,\text{SI}} - i_{\text{aa,SI}}) \quad \text{kJ/tc} \quad (2.55)$$

$$Q_{\text{elab}} = G_{\text{tecn}} \cdot (i_{2,\text{SI}} - i_{\text{aa,SI}}) + (\text{Pot}_{\text{TV},1} + \text{Pot}_{\text{TV},2}) \cdot \frac{3600}{\eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{elec}} \cdot \eta_{\text{tub}} \cdot t_{\text{ch}}} \quad \text{kJ/tc} \quad (2.56)$$

$$Q_{\text{cond}} = G_{\text{cond}} \cdot i_{\text{aa,SI}} \quad \text{kJ/tc} \quad (2.57)$$

$$\text{Perds} = Q_{\text{elab}} + Q_{\text{cond}} - Q_{\text{cald}} \quad \text{kJ/tc} \quad (2.58)$$

$$\text{Porc}_{\text{perds}} = \frac{\text{Perds}}{Q_{\text{cald}}} \cdot 100 \quad \% \quad (2.59)$$

2.6 Resultados obtenidos

2.6.1 Tabla de los resultados obtenidos.

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad de medida
Consumo de vapor de los motores primarios (Turbogeneradores)	$G_{\text{turb},1}$	208.3	kgv/tc
	$G_{\text{turb},2}$	333.3	
Jugo mesclado	JM	183 770	kg/h
Capacidad térmica específica del jugo.	$C_{p,\text{jg,cal,SI}}$	3.862	kJ/(kg-K)

Calor latente del vapor	h_{fg}	527.9	kcal/kg
Consumo de vapor de escape en calentadores de jugo	G_{cal}	33.10	kgv/tc
Calor latente de vaporización de jugo	t_1	2 208	kJ/kg
Calor latente de condensación del vapor de escape	t_{vap}	2 197	kcal/kg
Consumo de vapor pre-evaporador	$G_{pre-evap}$	297.5	kgv/tc
Consumo de vapor en tachos, kg/h	G_{tachos}	145	kgv/tc
Total de consumo de los equipos tecnológicos	G_{tecn}	442.6	kgv/h
Cálculo del consumo de la válvula reductora	G_{VR}	65.97	kgv/tc
Cálculo de Otros	G_{otros}	27	kgv/tc
Generadores de vapor, consumo de vapor en calderas	G_{cald}	527.8	kgv/tc
Cálculo del % inyección directa a escape	$Porci_{inyecc}$	4.038	%
Valor calórico neto del bagazo	VCN	8 041.65	kJ/kgbag
Pérdidas de calor en gases de escape	$Q_{p,sl}$	1 467	kJ/kgbag
Calor recuperado en el vapor	Q_v	5 399	kJ/kgbag
Calor necesario para 1 kg de agua	Q_n	2 632.57	kJ/kgv
Índice de generación	E	2.05	tv/tbag
Bagazo combustible según molida	B_c	46 663	kgbag/h
Sobrante de vapor	SV	76.49	kgv/tc
Sobrante de bagazo	SB	5 906	kg bag/h
Bagazo acumulado	Bag_{ACUMUL}	18 072	tbag
Temperatura del agua de alimentación	t_{aa}	104	°C
Temperatura de los gases de escape	t_g	180	°C
Eficiencia en calderas	n_{cald}	67.04	%
Masa de bagazo quemado	B_q	40 757	Kgbag/h
Consumo en condensados	G_{cond}	475.6	kgag/tc

2.7 Conclusiones parciales

En el capítulo concluido, se realizó la caracterización de los aspectos fundamentales de la UEB central “Panchito Gómez Toro” así como sus principales áreas. Se mostró además el esquema simplificado del uso de vapor y los condensados. También se realizaron los cálculos de los principales parámetros del central con ayuda del software EES (*Engineering Equation Solver*), mostrando de esta manera los resultados obtenidos.

Capítulo III: Análisis de los resultados

Introducción

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se realiza el análisis de los resultados obtenidos, destacando de esta manera los valores más significativos y tomando las medidas necesarias que contribuyan con el ahorro de bagazo en el central UEB “Panchito Gómez Toro”.

3.1 Resultados obtenidos

Los resultados más significativos de los cálculos realizados se muestran en la siguiente tabla, estos corresponden a un período de zafra estimado de aproximadamente 150 días, y una molida de caña de 334 719 @ de caña diaria, valor inferior a la capacidad máxima del tándem de molino (450 000 @ caña diaria) y a un 30% de agua de imbibición.

Tabla 3.1 Resultados más significativos

Parámetros	Nomenclatura	Valor	Unidad de medida
Sobrante de bagazo	SB	5 906	kg bag/h
Bagazo acumulado	Bag _{ACUMUL}	18 072	tbag
Eficiencia en calderas	η_{cald}	67.04	%
Temperatura del agua de alimentación	t_{aa}	104	°C
Temperatura de los gases de escape	t_g	180	°C

Con el propósito de ahorrar bagazo en el central, se realiza un análisis de los principales factores que afectan al mismo.

El incremento del agua de imbibición, la baja eficiencia a que se encuentran operando las calderas de vapor, la temperatura del agua de alimentación y de los gases de escape, tienen una alta influencia en el bagazo acumulado en el central.

3.2 Análisis de la influencia del agua de imbibición en el ahorro de bagazo.

Para una mejor interpretación de lo ante dichos se realiza el análisis gráfico de la situación planteada.

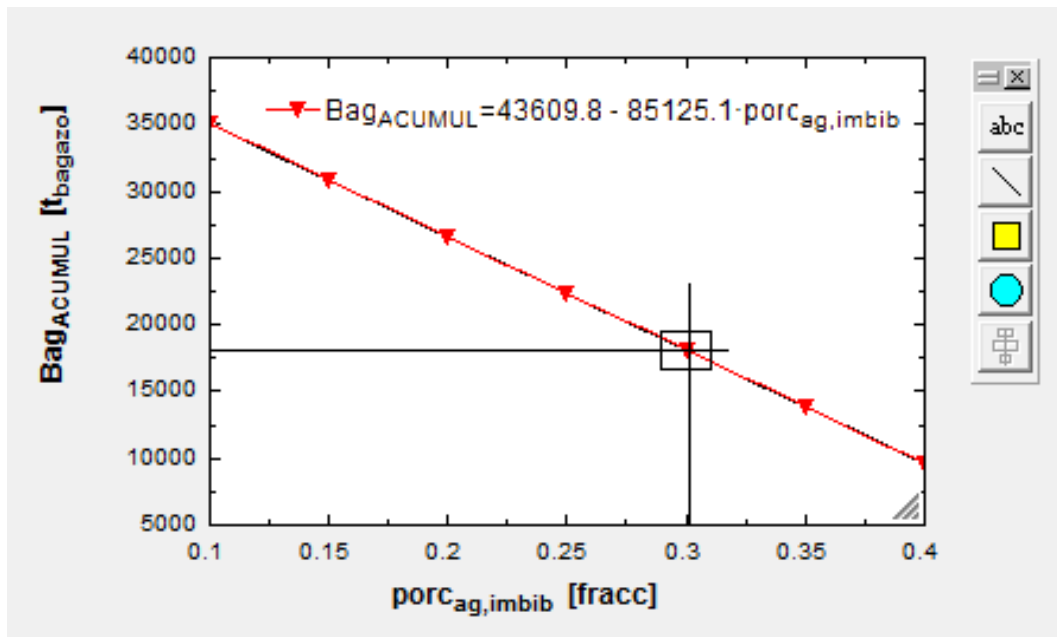


Fig. 3.1 Bagazo acumulado vs porcentaje de agua de imbibición

En la Fig. 3.1 se observar como el agua de imbibición tiene un comportamiento inversamente proporcional al bagazo acumulado, lo que significa que a medida que aumente el agua de imbibición disminuirá el bagazo acumulando, esto influye de forma negativa en el central como tributario, por lo que se propone la siguiente medida:

Medida tomada

- Disminuir el agua de imbibición de un rango del 30% a un 20% para ahorrar más bagazo sin que esto afecte la producción de azúcar del central.
- Instalación de un sistema automatizado que controle el flujo de agua de imbibición.

3.3 Análisis de la influencia de la eficiencia de las calderas de vapor en el ahorro de bagazo.

El estado en que se encuentre las calderas de vapor es de vital importancia ya que ellas son el corazón del central, si estas no se encuentran en un buen

estado no solo afecta el ahorro de bagazo sino las demás áreas de producción del central.

Basado en el mismo principio se realiza el análisis de la influencia que tiene la eficiencia de las calderas (η_{cald}) en el ahorro de bagazo.

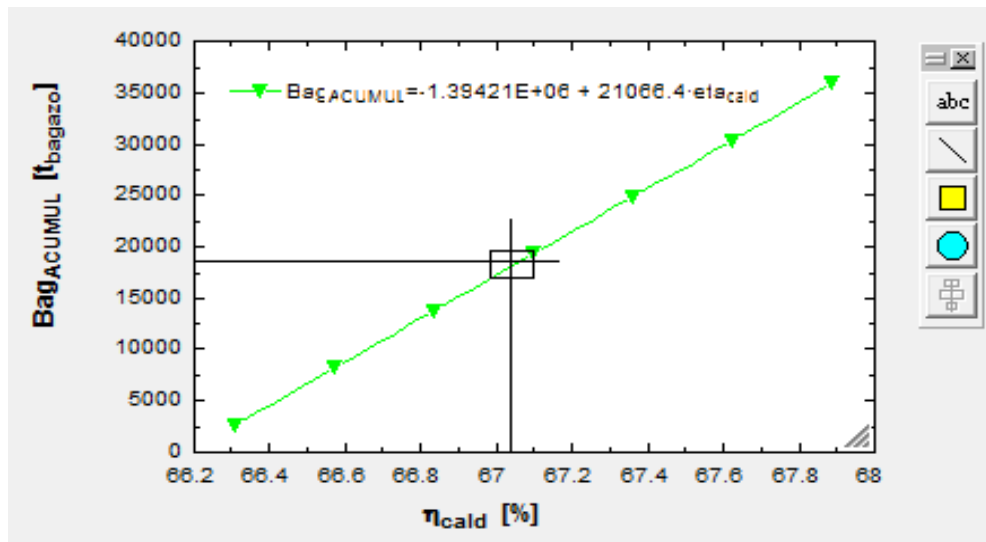


Fig. 3.2 Bagazo acumulado vs eficiencia de las calderas de vapor.

Al realizar un análisis de la Fig. 3.2 se puede apreciar que el bagazo acumulado aumenta a medida que la eficiencia de las calderas aumenta, de aquí la importancia de que estas se encuentren en buen estado técnico.

Dos factores que influyen en la eficiencia de las calderas de vapor y por consecuencia en el ahorro de bagazo son: la temperatura del agua de alimentación y la temperatura de salida de los gases.

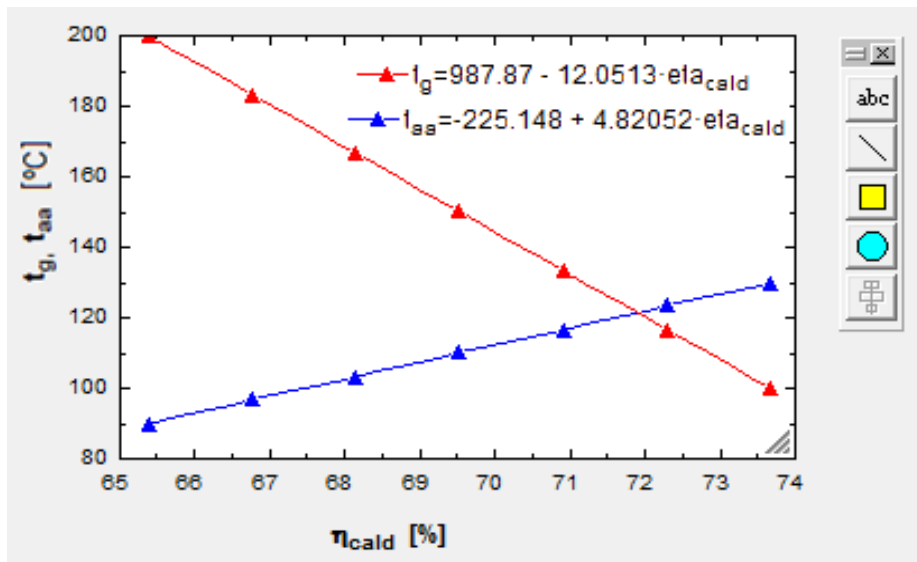


Fig. 3.3 Temperatura de agua de alimentación y de los gases de escape vs eficiencia de las calderas de vapor

Por lo antes planteado se recomienda el directivo de la UEB Central Azucarero “Panchito Gómez Toro” adoptar por la siguiente medida:

Medida adoptada

- Sustitución de las calderas de vapor del central, por otras que cumplan con los mismos parámetros de presión y temperatura (1,8 MPa a 320 °C) y tenga mayores valores de eficiencia (de ser posible nuevas).
- Mantener a un buen control sobre la temperatura de estos parámetros (t_{aa} y t_g).

3.4 Análisis de la influencia de la temperatura del agua de alimentación en el ahorro de bagazo.

La temperatura del agua de alimentación (t_{aa}) de las calderas de vapor tiene una gran influencia sobre la eficiencia de estas, por ende también influye de forma directa en la contribución de ahorrar bagazo. Un buen manejo de la temperatura de alimentación del agua a las calderas, contribuirá con el ahorro de bagazo.

En la Fig.3.4 se observa más claramente lo antes planteado y como con el aumento de la temperatura del agua de alimentación aumenta el bagazo acumulado.

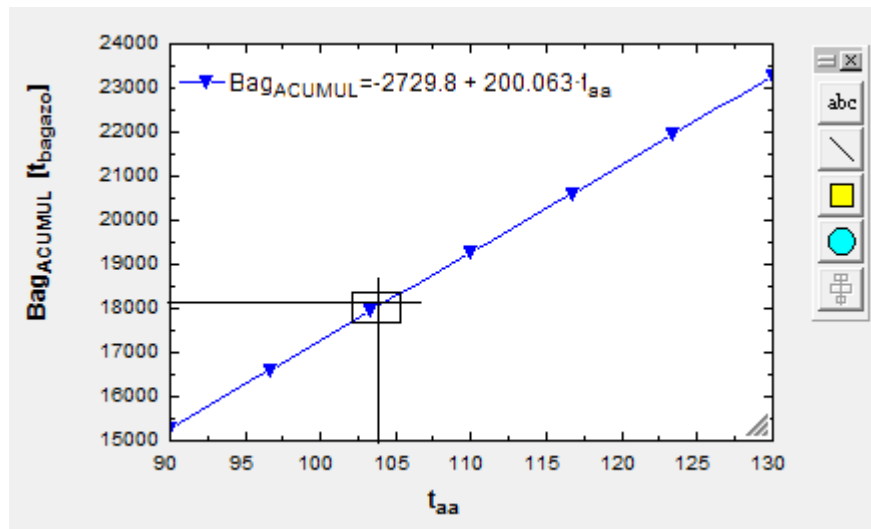


Fig. 3.4 Bagazo acumulado vs temperatura del agua de alimentación.

Al aumentar la temperatura del agua de alimentación en las calderas se ve de forma muy clara y precisa como aumenta el bagazo acumulado. Esto va ligado a que con el aumento de la temperatura de agua de alimentación, aumenta la eficiencia de la caldera y por consiguiente, al ser más eficiente se consume menos bagazo en el central y aumenta el bagazo acumulado.

Por lo se recomienda tomar la siguiente medida:

Medida a tomar

- Mantener el agua de alimentación de las calderas de vapor a una temperatura aproximada de 120 °C para un mayor ahorro de bagazo en el central.

3.5 Análisis de la influencia de la temperatura de los gases en el ahorro de bagazo.

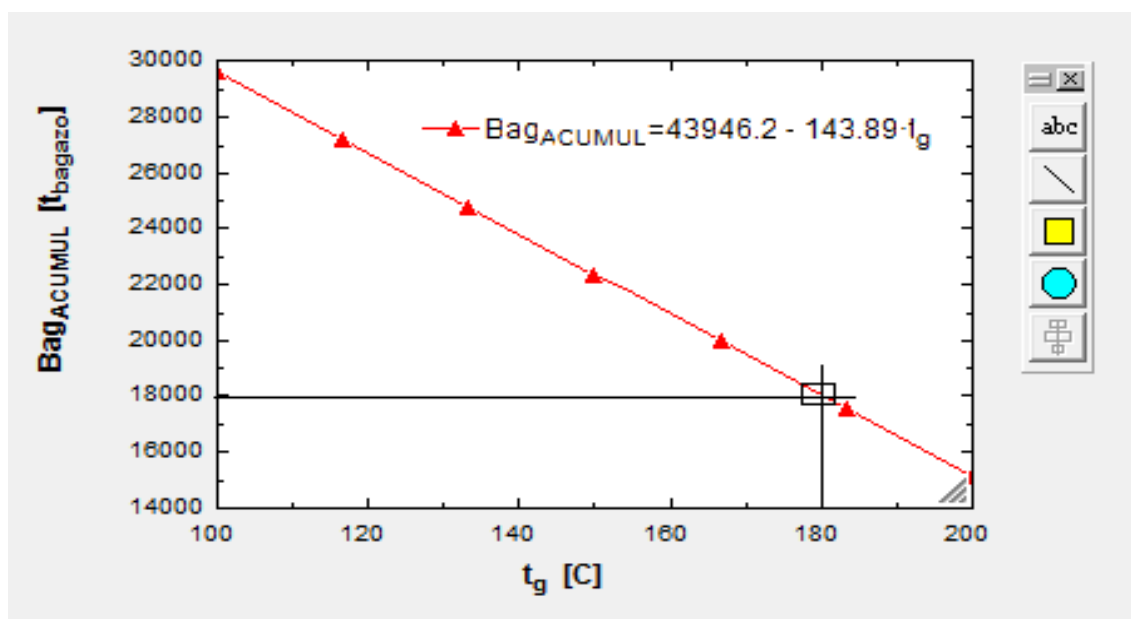


Fig. 3.5 Bagazo acumulado vs temperatura de los gases.

En el análisis realizado de la Fig. 3.5, se puede afirmar de forma concisa que a medida que aumenta la temperatura de los gases de escape, disminuye el bagazo acumulado en el central. Tener un buen control sobre este parámetro sería una buena **medida adoptada** para aumentar el ahorro de bagazo.

3.6 Propuesta de un sistema para controlar el flujo de agua de imbibición.

Con el objetivo de ahorrar bagazo en el central, se propone realizar un sistema con lenguaje de programación gráfico el cual muestra la cantidad de agua de imbibición suministrada, y en función de esta tener una idea muy cercana a la realidad de la cantidad de bagazo que se ahorra en el central.

El sistema se creó con uso del software LabVIEW (acrónimo de *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*), en el cual se aprecia de forma muy simple su funcionamiento.

El software LabVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con lenguaje de programación gráfico.

3.6.1 Sistema de lenguaje gráfico.

El sistema gráfico se creó con el fin de controlar el agua de imbibición y tener una respuesta rápida de la cantidad de bagazo acumulado.

Este sistema cuenta con un controlador para el agua de imbibición (1), este se encarga de medir el flujo de agua que se le suministra a los molinos, luego manda la señal a un indicador (2) en el cual podemos ver la cantidad de bagazo acumulado.

En la Fig. 3.6 y 3.7 se muestran la variación del bagazo acumulado para diferentes valores del agua de imbibición.

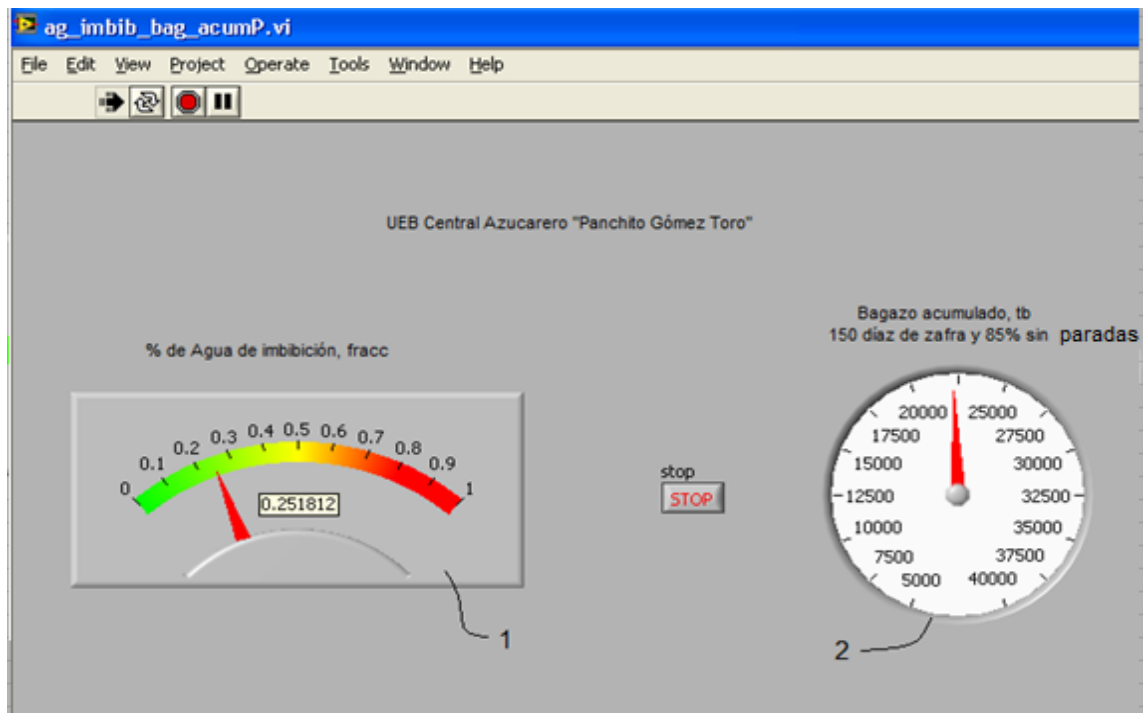


Fig. 3.6 Sistema para un 25 % de agua de imbibición.

Se puede apreciar que para un 25% del agua de imbibición, se muestra en el indicador del sistema la cantidad de bagazo acumulado, en este caso 22 328 t_{bag}.

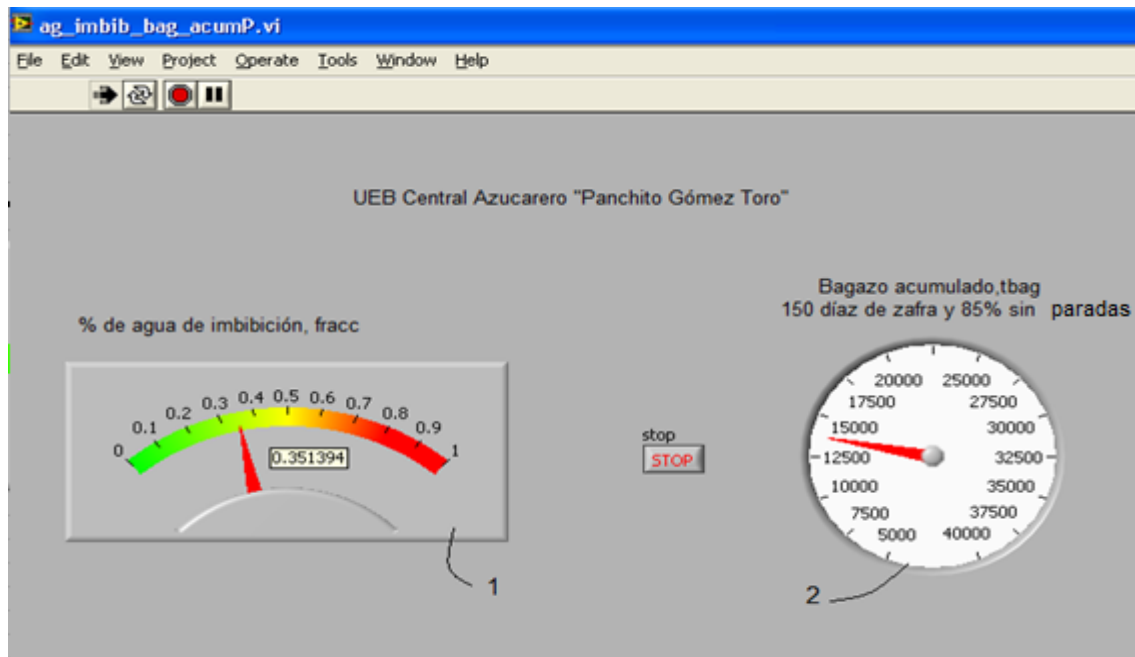


Fig. 3.7 Sistema para un 35 % de agua de imbibición.

Se puede apreciar que para un 35 % del agua de imbibición, se muestra en el indicador del sistema una disminución de la cantidad de bagazo acumulado, desde 22 328 t_{bag} hasta 13 816 t_{bag}.

3.6.2 Programación del sistema de lenguaje gráfico.

El área de programación del sistema cuenta con una gran variedad de herramientas (controladores e indicadores) y diferentes operadores de suma resta, multiplicación y muchas más, las cuales facilitan el trabajo y de esta forma poder programar el sistema mostrado.

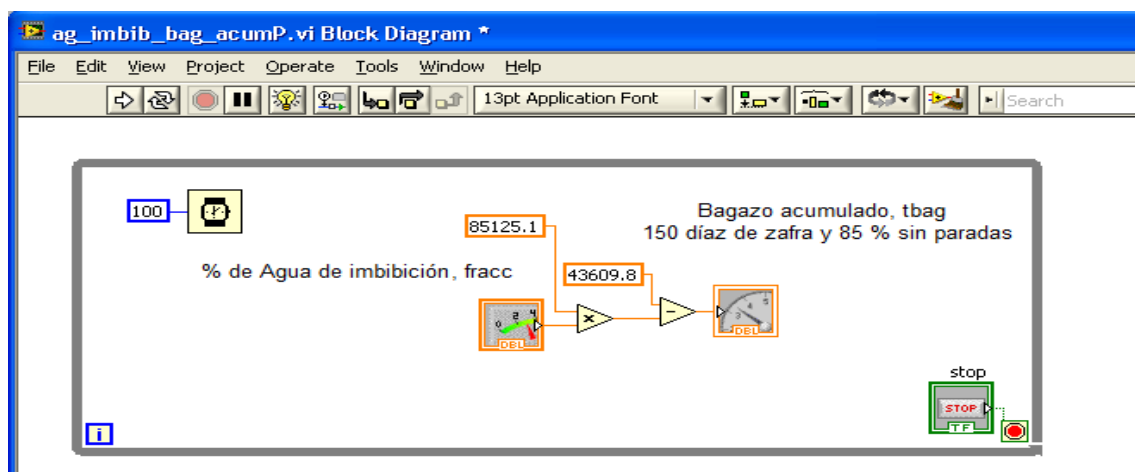


Fig. 3.8 Área de programación.

3.7 Conclusiones parciales

En el capítulo finalizado se realizó un análisis de los principales parámetros que intervienen con el ahorro de bagazo en la UEB “Panchito Gómez Toro”, para esto se utilizó el software EES. Se tomaron, de esta manera las medidas necesarias en relación con los objetivos planteados, dentro de la cuales se encuentra: realizar un sistema para medir el agua de imbibición utilizada en el central. También se realizó una breve explicación del funcionamiento de este sistema.

Conclusiones generales

1. En el Trabajo de Diploma realizado, se enunciaron los referentes teóricos que sustentan el marco de la investigación, donde no se encontró en la bibliografía revisada, referentes al ahorro del bagazo en centrales.
2. Se caracterizaron los aspectos fundamentales de la “UEB Central Panchito Gómez Toro”, así como sus principales áreas. Se mostró además el esquema simplificado del uso de vapor y de los condensados en el central.
3. También se realizaron los cálculos de los principales parámetros del central con ayuda del software EES (*Engineering Equation Solver*), mostrando de esta manera los resultados obtenidos.
4. Se realizó el análisis de los resultados obtenidos por EES en función de ahorrar bagazo, llegando de esta manera a la conclusión que existen varios factores que intervienen con el ahorro de bagazo:
 - El incremento del agua de imbibición por encima de los valores normales (30%).
 - La baja eficiencia que tienen las calderas del central (67).
 - La temperatura del agua de alimentación a las calderas (104 °C) y la temperatura de los gases de escape (180 °C).

Recomendaciones

1. Realizar a un nivel más profundo el estudio de otros factores que también afectan el ahorro de bagazo en el central.
2. Crear un sistema bajo el mismo principio de funcionamiento del lenguaje gráfico, para poder controlar los diferentes factores que intervienen en el ahorro de bagazo en el central.

Bibliografía

1. Almenares, V., 2009. *Impacto de la reconversión en la hidrólisis del bagazo para la reanimación de la producción de furfural como producto de alto valor agregado.*
2. Alonso, A. C., 2008. *Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba.*
3. Anon., 2017. *Por la Guía, Datos del central "Panchito Gómez Toro".*
4. Bahamondes, P. A., 2011. *Descripción de Calderas y Generadores de Vapor.*
5. Biomasa, E., 2009. *Energía Biomasa.*
6. Estupiñan, J., 2013. *Termodinámica Técnica. .*
7. Fraile, D., 2007. *Cogeneración: Aspectos tecnológicos..*
8. Fraile, D., 2010. *ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN GENERADOR DE VAPOR DE 350 MW.*
9. Golato, M. A., 2011. *Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán. .*
10. Gómez, O., 2009. *GÓMEZ, O. 2009. Simulación del proceso tecnológico de obtención de etanol a partir del bagazo de caña utilizando el Software Hysys. Trabajo de Diploma, Universidad Central Marta Abreu De Las Villas.*
11. Hugot, E., 1980. *Manual para Ingenieros Azucareros, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.*
12. Marcano, R., 2013. *GENERADORES DE VAPOR.*
13. Noriega, M. Á. D. R., 2011. *ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN GENERADOR DE VAPOR DE 350 MW.*
14. Pérez, C., 2016. *Evaluación energética del central, Trabajo de diploma FQF UCLV, 2016.*
15. Reyes, J. L., 2003. *Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento. .*
16. Rubio, Á., 2015. *Generadores de vapor Capítulo I.*
17. Silva, L., 2005. *Plantaciones forestales energéticas en el proceso de la cogeneración de energía en los ingenios azucareros de Nicaragua.*

18. Torres, F. D., 2012. *Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante?*.

Anexos

Anexo 1: Casa de bagazo del central UEB “Panchito Gómez Toro”



Fig. 1 Casa de bagazo.

Fuente: Elaboración propia



Fig. 2 Casa de bagazo.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Calentadores de jugo



Fig. 4 Calentadores de jugo

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Tachos de la UEB



Fig. 5 Tachos de la UEB

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Datos utilizados

Tabla 1: Datos del central utilizados para el cálculo de los parámetros.

Fuente: Evaluación energética del central, Claudia Pérez, 2016

Etapa	Datos	Nombre	Valor	UM
Mezclado y alcalización	$\rho(\text{CaO})$	Densidad del CaO.	1,045	kg/l
Calentador primario 1	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,135	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	42	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	58	°C
	Bx _{j.alc.}	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 231.79	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador primario 2	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,135	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	58	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	75	°C
	Bx _{j.alc.}	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 231.79	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador rectificador 1	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,179	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	75	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	92	°C
	Bx _{j.alc.}	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 208.02	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 1: Continuación

Calentador rectificador 2	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,179	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	92	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	104	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 208.02	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Calentador de jugo claro	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,204	MPa
	ti	Temperatura de entrada de los jugos.	95	°C
	tf	Temperatura de salida de los jugos.	111	°C
	Bx j.alc.	Brix del jugo alcalizado.	14	°Bx
	λ_v	Calor latente del vapor.	2 196.64	kJ/kg
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-
Pre-evaporador	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,204	MPa
	Pc	Presión del cuerpo.	0,179	MPa
	t _{jc}	Temperatura del jugo claro.	112	°C
	Bx _i	Concentración del jugo de entrada.	14	°Bx
	Bx _f	Concentración del jugo de salida	17,5	°Bx
	λ_c	Calor latente del vapor en el cuerpo.	2 208.02	kJ/kg
	λ_v	Calor latente del vapor alimentado.	2 196.64	kJ/kg
Evaporador	Pv alim.	Presión del vapor alimentado.	0,169	MPa
	Pc	Presión del cuerpo.	0,135	MPa
	t _{jc}	Temperatura del jugo claro.	112	°C
	Bx _i	Brix de entrada al 1er evaporador.	14	°Bx
	Bx _f	Brix de la meladura a la salida.	17,5	°Bx
	λ_c	Calor latente del vapor en el cuerpo.	2 208.02	kJ/kg
	λ_v	Calor latente del vapor alimentado.	2 196.64	kJ/kg
	t _{eb.}	Temperatura de ebullición del 1er efecto.	115	°C
	n	Número de efectos.	4	-
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 1: Continuación

Turbogenerador 1	N (prod.)	Eficiencia producida	2 500	kW-h
	Nt	Eficiencia termodinámica.	0,64	-
	Ho	Trabajo ideal de la máquina.	872.95	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
	λ_{ve}	Calor latente del vapor alimentado.	3 069.59	kJ/kg
	Pv sal.	Presión del vapor de salida.	0,204	MPa
	Tv sal.	Temperatura del vapor de salida.	125	°C
	λ_{vs}	Calor latente del vapor de salida.	2 510.69	kJ/kg
Turbogenerador 2	$\lambda(CAI)$	Calor latente del vapor en el ciclo adiabático ideal.	2 196.60	kJ/kg
	N (prod.)	Eficiencia producida	4 000	kWh
Calderas	Pv	Presión del vapor producido.	1,819	MPa
	Tv	Temperatura del vapor producido.	320	°C
	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	%
	λ_{vs}	Calor latente del vapor sobrecalentado.	3 069.59	kJ/kg
	m	Relación de aire empleado.	1,5	-
	α	Coeficiente de pérdidas.	0,99	-
	β	Coeficiente de pérdidas.	0,92	-
	γ	Coeficiente de pérdidas.	0,9	-
	x	Coeficiente de pérdidas.	1,05	-

Tabla 2: Datos de los tachos.

Fuente: Evaluación energética del central, Claudia Pérez, 2016

Tacho de MCA 1	Peso específico.	γ	1 450	kg/m ³
	Volumen del pie de templa.	V_i	10,9	m ³
	Volumen final.	V_f	21,24	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	92,66	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	56,95	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	2,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	92,86	°Bx
Tacho de MCA 2	Volumen del pie de templa.	V_i	10,9	m ³
	Volumen final.	V_f	21,24	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	92,26	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	56,96	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	2,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	93,06	°Bx

Tabla 2: Continuación

Tacho de MCB 1	Volumen del pie de templa.	V_i	19,52	m ³
	Volumen final.	V_f	33,04	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	88,80	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	71,88	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	94,8	°Bx
Tacho de MCB 2	Volumen del pie de templa.	V_i	19,52	m ³
	Volumen final.	V_f	33,04	m ³
	Concentración del pie de templa.	B_{x1}	89,34	°Bx
	Concentración del material alimentado.	B_{x2}	71,94	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	B_{x3}	94,1	°Bx

Tabla 2: Continuación

Tacho de MCC 1	Volumen del pie de templa.	Vi	14,22	m ³
	Volumen final.	Vf	42,28	m ³
	Concentración del pie de templa.	Bx ₁	88,80	°Bx
	Concentración del material alimentado.	Bx ₂	62,62	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	4,5	h
	Concentración final.	Bx ₃	96,00	°Bx
Tacho de MCC 2	Volumen del pie de templa.	Vi	14,22	m ³
	Volumen final.	Vf	42,28	m ³
	Concentración del pie de templa.	Bx ₁	89,34	°Bx
	Concentración del material alimentado.	Bx ₂	62,70	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	3,5	h
	Concentración final.	Bx ₃	95,9	°Bx

Anexos 5: Tabla de nomenclatura

Tabla 3: Nomenclatura utilizada.

Nomenclatura	Significado
UEB	Unidad Empresarial de Base
EES	Engineering Equation Solver
MPa	Mega Pascal
t/h	toneladas por hora
RAC	Residuos Agrícolas Cañeros
tce	tonelada de caña equivalente
tcm	tonelada de caña molida
MJ/kg	Mega Joule por kilogramo
t/ha	tonelada por hectárea
CECI	Calor Específico de Combustión Inferior CECI
CECS	Calor Específico de Combustión Superior CECS
MS	Materia Seca
@	Arroba
MWh	Mega Watts hora
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
VA	Voltio Ampere