

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FQF**  
Facultad de  
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Título: Análisis del desempeño energético del central azucarero  
Quintín Bandera

Autor: Walter Rodríguez Pérez

Tutores: Dr. C. Juan Pedro Hernández Touset  
Ing. Noslén Taimí Rodríguez Bazair

Santa Clara, Noviembre, 2022  
Copyright©UCLV

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FQF**  
Facultad de  
Química y Farmacia

Departament of Chemical engineering

## **DIPLOMA THESIS**

Title: Energy performance analysis of Quintín Bandera sugar mill

Author: Walter Rodríguez Pérez

Tutors: Dr. C. Juan Pedro Hernández Tousest

Ing. Noslén Taimí Rodríguez Bazair

Santa Clara  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte: Walter Rodríguez Pérez estudiante de la carrera de:  
Ingeniería Química en la facultad de: Química y Farmacia en lo adelante **EL ESTUDIANTE**. Con  
número de identidad permanente: 99080310446 o pasaporte: \_\_\_\_\_  
Y por otra parte Dr. C Nestor Ley Chong Jefe del Departamento Docente de: Ingeniería Química en  
la ya mencionada facultad, en lo adelante: **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**, y  
Dr. C. Juan Pedro Hernández Touset  
profesor(es) encargado(s) de tuturar el Trabajo de Diploma **DEL ESTUDIANTE**, en lo adelante **EL TUTOR**.

Reconocen que:

- I. A **EL ESTUDIANTE** se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma el  
titulado Análisis del desempeño energético  
del central azucarero Quintín Bandera
- II. **EL ESTUDIANTE** no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo  
como tras la culminación de esta sin la debida autorización **DEL TUTOR** o **EL JEFE DE  
DEPARTAMENTO**.
- III. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de **EL ESTUDIANTE** y la asesoría de **EL  
TUTOR**, resulta de **TITULARIDAD EXCLUSIVA** de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- IV. **EL ESTUDIANTE** una vez aprobada su tesis para su defensa, depositará una copia electrónica de la  
misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- V. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración  
de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de **EL ESTUDIANTE**, contará con la  
coautoría de **EL TUTOR** y viceversa, resultando de referencia obligada esta obra en cualquier otra que  
se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio.  
Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los  
29 días del mes de Noviembre del año 2022

\_\_\_\_\_  
EL ESTUDIANTE

\_\_\_\_\_  
JEFE DE DEPARTAMENTO

\_\_\_\_\_  
TUTOR

\_\_\_\_\_  
TUTOR



*“La única forma de impulsar tareas, es yendo delante de las tareas, es mostrando con el ejemplo cómo se hace, no diciendo desde atrás cómo se deben hacer”.*

*Ernesto Che Guevara*

## *Dedicatoria*

**Le dedico este trabajo a:**

***A mis padres, por su sacrificio, educación y amor, por apoyarme siempre y ser incondicionales.***

***A toda mi familia por su cariño, su dedicación, por estar siempre a mi lado.***

## *Agradecimientos*

Este trabajo es el fin de cuatro años de estudio y sacrificio, y por el cual le estoy agradecida a una serie de personas que de una forma u otra han contribuido a realizar mi sueño de formarme como profesional.

- ✓ *A mis padres, por traerme a la vida, enseñarme a vivirla y a luchar por alcanzar mis sueños, por su entrega, su comprensión y su amor.*
- ✓ *A mis abuelos, por protegerme siempre, por estar a mi lado, por darme fuerzas.*
- ✓ *A mi novia Lianny por ser parte de mi vida, y apoyarme en cada paso del camino.*
- ✓ *A mis tías y tíos, primos, en fin a toda mi familia, a todos los que me apoyaron y confiaron en mí.*
- ✓ *A mis compañeros de grupo, por compartir momentos inolvidables.*
- ✓ *A mi tutor Juan Pedro, por su ayuda incondicional y dedicar parte de su tiempo a mi tesis.*
- ✓ *A todos los profesores que de una u otra forma han contribuido a mi formación.*

A todos, muchas gracias

### **Resumen**

El proceso de producción de azúcar crudo del central azucarero Quintín Bandera presenta pérdidas de recursos materiales y financieros por concepto de ineficiencias en la recuperación de la energía, así como deficiencias tecnológicas, que provocan una disminución de la eficiencia térmica general del proceso. El objetivo es evaluar el sistema energético, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía, para la reducción de los consumos de energía y agua en el central azucarero. La evaluación del desempeño energético se sustenta en la implementación de un procedimiento para el análisis del uso de la energía según la norma cubana ISO 50001 para los sistemas de gestión de la energía. Las pérdidas de calor representan el 47,8 %, muy por encima del valor normado, y por tanto provocan un consumo adicional de combustible, que determinan un consumo de bagazo adicional de 63 260 t/a muy cercano a un déficit de bagazo de 52 433 t/a. Se determinan 14 indicadores de desempeño energético, no reportados hasta ahora en este central azucarero, a partir de los cuales se puede definir una línea base energética para la evaluación sistemática de la eficiencia del uso de la energía. El ingreso estimado por concepto de ahorro de agua de reposición y calor perdido, hace factible proponer un proyecto de inversión, un VAN de \$ 280 012 cuyo presupuesto se recupera en aproximadamente 5 años.

**Abstract**

The raw sugar production process of Quintín Bandera sugar mill presents losses of material and financial resources due to inefficiencies in energy recovery, as well as technological deficiencies, which cause a decrease in the general thermal efficiency of the process. The objective is to evaluate the energy system, through the application of energy management systems, to reduce energy and water consumption in the sugar mill. The energy performance assessment is based on the implementation of a procedure for the analysis of energy use according to the Cuban standard ISO 50001 for energy management systems. Heat losses represent 47, 8%, above the standard value, and therefore cause additional fuel consumption, which determines an additional bagasse consumption of 63,260 t/a, very close to a bagasse deficit of 52 433 t/a. 14 energy performance indicators are determined, not reported so far in this sugar mill, from which an energy baseline can be defined for the systematic assessment of the efficiency of energy use. The estimated income from saving replacement water and lost heat makes it feasible to propose an investment project with a NPV of \$280 012, whose budget is recovered in 5 years .

## Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I. Análisis bibliográfico</b> .....	3
<b>1.1 Generalidades sobre el proceso de producción de azúcar crudo y refino</b> ....	3
1.1.1 La caña de azúcar.....	3
1.1.2 Subproductos derivados de la caña de azúcar.....	4
<b>1.2. Aprovechamiento de la biomasa para generación de energía</b> .....	5
1.2.1. Procesos de Combustión Directa.....	5
1.2.2. Procesos Termo-Químicos.....	5
1.2.3. Procesos Bio-Químicos.....	5
<b>1.3 Gestión energética</b> .....	6
1.3.1 Sistema de Gestión de la Energía (SGE). Norma Cubana 50 001.....	6
1.3.2 Elementos de un Sistema de Gestión de la Energía.....	7
1.3.3 Herramientas que se utilizan para establecer un Sistema de Gestión Energética.....	8
<b>1.4 Diagnóstico Energético</b> .....	8
1.4.1 Características del Diagnóstico Energético.....	8
1.4.2 Clasificación de los Diagnósticos Energéticos.....	10
<b>1.5 Cogeneración</b> .....	11
1.5.1 Cogeneración en la industria azucarera.....	11
1.5.2 Sistemas de cogeneración.....	11
1.5.3 Definición del nivel de cogeneración.....	12
1.5.4 Algunos índices usados en centrales azucareros.....	12
1.5.5 Herramientas para determinar la eficiencia de los sistemas de cogeneración.....	15
<b>1.6 Aguas y sistemas de condensados</b> .....	15
1.6.1 Requerimientos de agua en los ingenios.....	16
1.6.2 Retorno de condensados.....	16
<b>Capítulo II. Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero</b> .....	18
<b>2.1 Metodología de análisis del uso de la energía</b> .....	18
<b>2.2 Diagnóstico de primer nivel en el central azucarero</b> .....	21
<b>2.2.1 Descripción general del central azucarero</b> .....	21
2.2.3 Descripción del proceso de fabricación de azúcar crudo por etapas.....	23
2.2.4 Caracterización del esquema energético.....	28
2.2.7 Demanda de vapor del proceso.....	36

2.2.8 Balance de condensados .....	37
2.2.9 Determinación de los indicadores de desempeño energético .....	37
Capítulo III. Análisis del desempeño energético del central azucarero .....	39
3.2 Propuesta tecnológica en el esquema energético .....	42
3.2.1 Balance de materiales en el esquema tecnológico propuesto .....	43
3.2.2 Dimensionamiento del secador de bagazo .....	43
3.2.3 Evaluación económica de la propuesta tecnológica .....	45
Conclusiones .....	49
Recomendaciones .....	50
Referencias bibliografía .....	51
Anexos .....	55

# Introducción

## **Introducción**

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 ha constituido históricamente el sector principal de la economía cubana, ello se explica entre otras razones, por su peso decisivo en la dinámica productiva del país.

En las condiciones actuales de la agroindustria, agravada por el recrudescimiento del bloqueo y la crisis mundial provocada por la COVID 19, la estrategia elaborada para el 2030 no es viable desde el punto de vista financiero.

El Grupo Temporal de Trabajo realizó de julio a septiembre la identificación de los principales problemas del sector, sus causas y las propuestas de solución, partiendo del análisis de los diagnósticos y recomendaciones. Los principales problemas internos identificados que le corresponden a la industria son: (1) pobre revalorización de los coproductos y derivados, (2) alta obsolescencia y mal estado técnico de la maquinaria agroindustrial, y en particular en las bases energéticas, (3) deficiente administración y falta de modelos de gestión que garanticen eficiencia económica, calidad e inocuidad, Incumplimiento de las tecnologías establecidas en los instructivos técnicos, insuficiente uso de la automatización e informatización, (4) deficiente gestión de la ciencia e innovación, (5) insuficiente preparación y motivación del personal.

En la provincia Villa Clara, actualmente juega un papel significativo la Empresa Azucarera “Quintín Bandera”, ubicado en el municipio Corralillo, la cual se destaca por su gran aporte a la economía del país y su contribución a la gestión ambiental del territorio. Esta industria se dedica al procesamiento de la caña de azúcar, obteniendo como producto final el azúcar refino; en tiempo de no zafra la industria procesa el azúcar proveniente de los centrales azucareros “Panchito Gómez Toro” y “Héctor Rodríguez”. El azúcar refino obtenido en la UEB se destina para el consumo nacional, y la energía que se produce en la fábrica en tiempo de zafra es a partir del bagazo como portador de energía.

Actualmente existen pérdidas de recursos materiales y financieros por concepto de ineficiencias en la recuperación de la energía, así como deficiencias tecnológicas, que provocan una disminución de la eficiencia térmica general del proceso. La determinación del potencial de generación de vapor, mediante el análisis y la evaluación de la situación de aprovechamiento de los recursos energéticos de forma eficaz, permite identificar las oportunidades de mejora de los indicadores de eficiencia. Sin embargo, actualmente son escasas las fuentes de información de la operación para la determinación de indicadores de eficiencia energética.

# Introducción

## **Problema de investigación:**

El control del desempeño energético en el central azucarero está limitado por el insuficiente registro y análisis de la información de operación de la industria y la aplicación sistemática de un procedimiento de análisis de la energía que permita determinar los indicadores de eficiencia y establecer una línea base energética.

## **Hipótesis:**

Es posible la identificación de las deficiencias en el uso de la energía y el agua, mediante la aplicación de un procedimiento de análisis de la energía térmica en el central azucarero.

## **Objetivo General:**

Evaluar el sistema energético, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía, para la reducción de los consumos de energía y agua en el central azucarero.

## **Objetivos específicos:**

- Realizar análisis bibliográfico sobre tecnologías, equipamiento y esquemas térmicos en la producción de azúcar crudo.
- Evaluar el potencial energético de la industria, mediante el registro y análisis de la información sobre la generación, distribución y uso de la energía.
- Determinar los ahorros de recursos energéticos asociados a las fuentes actuales de pérdidas de energía térmica y agua.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica de proyecto de inversión para la mejora de la eficiencia térmica de la industria.

## **Capítulo I. Análisis bibliográfico**

La agroindustria de la caña de azúcar puede y debe ayudar a afrontar en un futuro inmediato tres importantes desafíos que hoy enfrenta la humanidad: la producción de alimentos, el déficit energético, y la preservación del medio ambiente.

La caña de azúcar ha venido demostrando que es la gramínea por excelencia para el logro de los mejores resultados como fuente de energía renovable, debido al gran potencial energético que es capaz de acumular. En Cuba se perfecciona el proceso agroindustrial del sector azucarero con el objetivo de elevar la eficiencia en la generación eléctrica mediante los procesos de cogeneración en las centrales. La fuerte inversión que ha comenzado en el sector azucarero cubano persigue garantizar los planes para el desarrollo económico que lleva a cabo el país (Sánchez, 2018).

Por ello la identificación de las áreas de mayores consumos energéticos, de insumos y combustibles, así como la determinación de esquemas de cogeneración adecuados, pueden contribuir a establecer un plan de mejoras tecnológicas, traduciéndose en el incremento de la producción de electricidad a la red nacional, así como la eficiencia y sostenibilidad de dicha industria teniendo en cuenta el carácter renovable de la caña de azúcar (Mateo, 1996).

En el presente capítulo se identifican las principales características del proceso de producción de azúcar crudo y refino, de los sistemas de gestión de la energía y de condensados, así como elementos en el uso eficiente de los mismos para la posterior reducción de sus consumos.

### **1.1 Generalidades sobre el proceso de producción de azúcar crudo y refino**

#### **1.1.1 La caña de azúcar**

La caña de azúcar es una planta herbácea de gran tamaño que se cultiva en países tropicales y subtropicales. Aunque dicha materia prima no es un producto autóctono americano, fue introducido en América por los españoles, portugueses y otros europeos. Se adaptó rápidamente a las tierras intertropicales americanas, hasta el punto de que los mayores productores mundiales se encuentran en este continente (Morales, 2011).

La caña de azúcar es una materia prima con características relevantes que la sitúan como la planta comercial de mayores rendimientos en materia verde, energía y fibra, obtenidos en ciclos de tiempo menores que otras especies (Villegas, 2005). Está compuesta básicamente por fibra vegetal (bagazo) y jugo (agua, azúcares y no azúcares), en la tabla 1.1 se indican sus componentes básicos.

Tabla 1.1 Composición de la caña de azúcar

Componente	Valores medios en %
Azúcares totales	10.0 a 15.0
Fibra en caña	11.0 a 16.0
Agua	70.0 a 75.0
Sales <sup>1</sup>	≈ 0.5
Cuerpos nitrogenados	≈ 0.4
Ceras, grasas y ácidos.	≈ 0.6

Fuente: (Villegas, 2005)

La caña de azúcar es una materia prima con excelentes condiciones para captar y almacenar la energía solar; a partir de ella generar importantes cantidades de electricidad. Representa la mayor cantidad de biomasa en relación a otros cultivos. Adicionalmente, la caña permite obtener decenas de derivados de alto valor agregado tales como bagazo, miel y cachaza (González, 2015).

### **1.1.2 Subproductos derivados de la caña de azúcar**

Los subproductos del proceso de obtención de azúcar de caña son fundamentalmente el bagazo, la miel y la cachaza (Fernández, 2013)

- Bagazo: Es el residuo separado después de la extracción del jugo de la caña de azúcar y es el principal subproducto de la industria azucarera, representando el 30 % de los tallos verdes molidos (GONZÁLEZ, 2016). La tecnología para la producción del azúcar indica que la materia prima trae en el bagazo el combustible necesario para la fábrica de azúcar, pudiendo entregar combustible y energía térmica o eléctrica después de satisfacer sus propias necesidades (Chen, 1999)

- Miel final: Se llama miel final o miel de purga al subproducto proveniente de la centrifugación de la masa cocida de tercera. Además de los azúcares no cristalizados, las mieles finales contienen compuestos orgánicos y sales inorgánicas que pasan a esta a través del proceso de fabricación. Se destinan principalmente para la alimentación animal y usos industriales, por lo general, en la producción de alcohol etílico, rones y levaduras (ICIDCA, 1986).

- Cachaza: La cachaza obtenida en el proceso de purificación de los jugos presenta un valor tal, que se puede catalogar como un subproducto y no como un residual. Las principales aplicaciones, considerando las experiencias desarrolladas en Cuba son: la fertilización orgánica y mineral de los suelos en forma directa; la elaboración de compost; la producción de biogás y fertilizantes y la producción de alimento animal (CITMA, 1998).

En el Anexo 1, se presenta el esquema de los subproductos fundamentales de la industria azucarera y sus producciones derivadas.

## **1.2. Aprovechamiento de la biomasa para generación de energía**

Para facilitar la transportación de la biomasa con fines energéticos es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la cogeneración.

Entre los procesos de conversión de biomasa más relevantes, se encuentran: procesos de combustión directa, procesos termo-químicos y procesos bioquímicos.

### **1.2.1. Procesos de Combustión Directa**

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado. (Morales, 2011).

### **1.2.2. Procesos Termo-Químicos**

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido. El proceso básico se llama pirolisis o carbonización (Morales, 2011)

### **1.2.3. Procesos Bio-Químicos**

Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiológicos para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. Los más relevantes son:

*Digestión anaeróbica:* la digestión de biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico) produce un gas combustible llamado biogás. En el proceso, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (digestor) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono (Morales, 2011).

### **1.3 Gestión energética**

Para realizar una gestión energética eficaz se debe considerar la energía como un recurso más, otorgándole un valor equiparable con el resto de los mismos (materiales, mano de obra, materias primas, etc.). De esta forma, los Sistemas de Gestión Energética (SGE) tratan la energía como un recurso que se debe contabilizar para así alcanzar los objetivos de consumos específicos predeterminados que permitirán (Nordelo, 2013):

Controlar la adquisición, almacenamiento y consumo de todo tipo de energía, manteniendo una contabilidad periódica de los mismos y de los indicadores correspondientes.

Identificar qué áreas de actividad requieren mayor estudio y aquellas donde se malgasta energía.

Minimizar los costos de energía.

Proteger al medio ambiente en materia de emisiones y residuos industriales.

La política sobre el uso racional de la energía en las fábricas químicas está dirigida a obtener la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía que permita reducir de forma sistemática los indicadores y costos energéticos, como una de las vías para alcanzar la competitividad en las producciones y los servicios.

La gestión energética puede ser concebida como un esfuerzo organizado y estructurado, para conseguir la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía; es decir, lograr un uso más racional, que permita reducir el consumo de la misma sin perjuicio del confort, productividad, calidad de los servicios y de forma general, sin disminuir el nivel de vida. Se considera uno de los mejores caminos para conseguir los objetivos de conservación de energía, tanto desde el punto de vista de la propia empresa como a nivel nacional. En resumen, todas aquellas actividades a realizar para lograr un ahorro sustancial de energía y una mejora en la eficiencia energética de una fábrica química se pueden conceptualizar dentro de los sistemas de gestión energética (Borroto, 1998) (Espinosa, 2014).

#### **1.3.1 Sistema de Gestión de la Energía (SGE). Norma Cubana 50 001**

La Norma Cubana (Normalización, 2019) especifica los requisitos de un sistema SGE a partir del cual la organización puede desarrollar e implementar una política energética y establecer objetivos, metas y planes de acción que tengan en cuenta los requisitos legales y la información relacionada con el uso significativo de la energía; en la cual se definen los siguientes aspectos principales: objeto y campo de aplicación, referencias normativas, términos y definiciones y los requisitos del sistema de gestión de la energía; este último aspecto incluye: requisitos generales, responsabilidad de la dirección, política energética, planificación energética, implementación y operación, verificación y revisión por la dirección. En la planificación energética se desarrolla la revisión energética y en la implementación y operación, el diseño (Borroto, 2000).

### **1.3.1.1 Revisión energética**

Según la norma, la organización debe desarrollar, registrar y mantener una revisión energética. La metodología y el criterio utilizados para desarrollar la revisión energética deben estar documentados (Briceños, 1997).

Para desarrollar la revisión energética, la organización debe:

- a) Analizar el uso y el consumo de la energía basándose en mediciones y otro tipo de datos, entre ellos; identificar las fuentes de energía actuales; evaluar el uso y consumo pasados y presentes de la energía.
- b) Identificar las áreas de uso significativo de la energía; identificando las instalaciones, equipamiento, sistemas, procesos y personal que trabaja para la organización que afecten significativamente el uso y consumo de la energía; identificar otras variables pertinentes que afectan a los usos significativos de la energía; determinar el desempeño actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía; estimar el uso y consumos futuros de energía.
- c) Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

La revisión energética debe ser actualizada a intervalos definidos, así como en respuesta a cambios mayores en las instalaciones, equipamiento, sistemas o procesos.

### **1.3.2 Elementos de un Sistema de Gestión de la Energía**

La política energética es el impulsor de la implementación y la mejora del SGE y del desempeño energético de la organización dentro de su alcance y límites definidos. La política puede ser una breve declaración que los miembros de la organización pueden comprender fácilmente y aplicar en sus actividades laborales. La difusión de la política energética puede utilizarse como elemento propulsor para gestionar el comportamiento de la organización (Borroto, 2006a).

El objetivo de un sistema de gestión de la energía es mejorar la eficiencia energética y no repetir comportamientos ineficientes anteriores. El logro de este objetivo debe conducir a la reducción de los costos y de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la gestión sistemática de la energía (Coakled, 2010).

El primer paso de la revisión energética consiste en identificar las fuentes de energía utilizadas por la organización dentro de los límites y alcances definidos para el SGE. Las fuentes de energía pueden ser variadas, incluyendo combustibles, electricidad, vapor, calor, aire comprimido, entre otros. Es posible que existan fuentes de energía, tales como el aire comprimido, vapor y calor, que no sean consideradas como tal por la organización, debido a que generalmente son generadas por la misma empresa. Sin embargo, es posible hacer gestión energética importante sobre estas fuentes de energía secundaria.

Además, el uso eficiente de este tipo de energía puede dejar capacidad para reemplazar otro tipo de consumo de energía.

### **1.3.3 Herramientas que se utilizan para establecer un Sistema de Gestión Energética**

Las herramientas de trabajo son aquellas que nos permiten implementar las secuencias de mejora. Por su nivel de complejidad generalmente se clasifican en básicas, medias y avanzadas (Borroto, 2002).

Las herramientas básicas fundamentalmente que se utilizarán son las siguientes:

- Diagrama de Pareto: son gráficos especializados de barras que presentan la información en orden descendente, desde la categoría mayor a la más pequeña en unidades y en porcentaje. Los porcentajes agregados de cada barra se conectan por una línea para mostrar la suma incremental de cada categoría respecto al total.
- Histogramas: representación gráfica de la distribución de uno o varios factores que se confecciona mediante la representación de las medidas u observaciones agrupadas en una escala sobre el eje vertical. Generalmente se presenta en forma de barras o rectángulos cuyas bases son dadas por los intervalos de clases y las alturas por las frecuencias de aparición de las mismas.
- Diagrama de dispersión: permite observar la relación que existe entre una supuesta causa y un efecto. Su uso permite comprobar o verificar hipótesis que pudieran haberse desprendido del análisis del diagrama Ishikawa.
- Gráficos de control: es la acción de hacer coincidir los resultados con los objetivos. Persigue elevar al máximo el nivel de efectividad de cualquier proceso. Para que exista la acción de control debe existir un estándar (objetivo a lograr), una medición del resultado, herramientas que permitan comparar los resultados con el estándar e identificar las causas de sus desviaciones y variables de control, sobre las cuales actuar para acercar el resultado al estándar.

## **1.4 Diagnóstico Energético**

### **1.4.1 Características del Diagnóstico Energético**

El concepto actual de diagnóstico o auditoría energética se expresa como la aplicación de un conjunto de técnicas que permiten determinar el grado de eficiencia con que se produce, transporta y usa la energía en los diferentes equipos de las instalaciones analizadas.

El diagnóstico energético tiene por objetivo identificar oportunidades de uso eficiente de la energía, se emplean distintas técnicas para evaluar grado de eficiencia con que se produce, transforma y usa la energía. Constituye la herramienta básica para saber cuánto, cómo, dónde y por qué se consume la energía dentro de la empresa, para establecer el grado de eficiencia en su utilización, para identificar los principales potenciales de ahorro energético y

# Capítulo I

## Revisión Bibliográfica

económico, así como definir los posibles proyectos de mejora de la eficiencia energética (Borroto, 2006a), y establecer una línea base contra la cual se deberán evaluar los beneficios obtenidos como resultado de la implementación de las mejoras y recomendaciones asociadas con las oportunidades identificadas.

De acuerdo con (CNEE, 2010), los objetivos principales de un diagnóstico energético son: Establecer metas de ahorro de energía; Diseñar y aplicar sistemas integrales para el ahorro de energía; Evaluar técnica y económicamente las medidas de ahorro de energía; Disminuir el consumo de energía, sin afectar negativamente los niveles y condiciones de producción. Con la realización del diagnóstico se logra la optimización del uso y administración de energía. Se conoce cómo y dónde se utiliza la energía eléctrica con el fin de establecer el gasto innecesario de la misma y se elimina del despilfarro de energía (EGRANCONEL, 2006) (Capote, 2001).

### 1.4.1.1 Aspectos a tener en cuenta en la realización de un diagnóstico energético en un central azucarero

Para el cálculo del consumo de vapor de los diferentes equipos que intervienen en el proceso de fabricación del azúcar de caña en un central azucarero, se requiere establecer previamente las variables y parámetros que son necesarios medir y/o determinar. Según (Rodríguez, 1997) (Hernández, 2010), algunos de estos son los siguientes;

- Máquinas de vapor y bombas de vacío: presión de entrada y de salida del vapor ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), rpm de la máquina, carrera del pistón, área efectiva del pistón, presión media efectiva a partir de los diagramas indicadores o por cálculo ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ).
- Turbogeneradores: presión de entrada y de salida del vapor ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), temperatura de entrada y de salida del vapor, ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Generadores de vapor: presión del vapor a la salida del generador de vapor ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), temperatura del vapor a la salida del generador de vapor ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad del bagazo (%) y de bagazo por ciento caña (%), superficie total instalada ( $\text{m}^2$ ), análisis de los gases de salida, temperatura de los gases de salida ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Calentadores: presión del vapor de escape o secundario ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), temperatura del vapor de escape o secundario ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura de entrada del jugo ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura de salida del jugo ( $^{\circ}\text{C}$ ), concentración del jugo alimentado ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), temperatura del condensado ( $^{\circ}\text{C}$ ), masa de jugo alimentado (kg).
- Estación de evaporación: presión del vapor en la calandria ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), temperatura del vapor de la calandria ( $^{\circ}\text{C}$ ), presión del vapor en el cuerpo ( $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), temperatura del vapor en el cuerpo ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura de ebullición ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del jugo alimentado ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del condensado ( $^{\circ}\text{C}$ ), concentración de entrada al efecto ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), concentración de salida del efecto ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), masa del jugo alimentado al primer efecto o al pre-evaporador (kg).

# Capítulo I

## Revisión Bibliográfica

- Tachos: volumen del material inicial (pie o semilla), volumen final alcanzado en el tacho, concentración del producto final ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), concentración del producto alimentado ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) (miel o meladura), concentración del producto final ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) (masa cocida), tiempo de operación en cada cochura (s), temperatura del condensado ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 1.4.2 Clasificación de los Diagnósticos Energéticos

El diagnóstico de nivel uno o básico (DEN 1) se lleva a cabo mediante un examen visual del proceso industrial o instalación de que se trate, reconociendo y revisando el diseño original de los equipos consumidores de energía, para dar una idea de los potenciales de ahorro de energía que se pueden lograr por modificación en los hábitos de operación, corrección de desperdicios o por la incorporación de tecnologías eficientes. Su principal ventaja es dar una idea general sobre si existe o no posibilidad de ahorro energético. Este nivel tiene un costo económico, que es el de menor respecto a los de niveles superiores (Espinosa, 2014).

El diagnóstico energético de nivel dos (DEN 2) o fundamental: proporciona información sobre el consumo de energía tanto eléctrica como térmica por áreas funcionales o procesos específicos de operación, es decir se detectan los subsistemas de mayor desperdicio energético. Este nivel provee datos acerca del ahorro de energía y en consecuencia de reducción de costos, como consecuencia de su realización se obtiene una cartera de proyectos de aplicación, logrando de esta forma dirigir el camino de las metas para ahorro energético (Espinosa, 2014), además de incluir aspectos de mantenimiento y control automático relacionados con el ahorro y uso eficiente de la energía (Borroto, 2006b). El balance de materiales y energía, los planos actualizados, así como la disposición de los índices energéticos reales y de diseño complementan el diagnóstico, ya que permiten establecer claramente la distribución de la energía en las instalaciones, las pérdidas y desperdicios globales y así se determina la eficiencia con la que se utiliza la energía (McKeen, 2003).

El diagnóstico energético de tercer nivel (DEN 3) proporciona información precisa y comprensible, de todos y cada uno de los puntos relevantes del diagrama del proceso industrial o cualquier instalación a evaluar, así como las pérdidas de energía de cada uno de los equipos involucrados. Este nivel está caracterizado por instrumentación extensiva, por la adquisición de datos y por los estudios de ingeniería involucrada (Espinosa, 2014).

En el diagnóstico energético de cuarto nivel (DEN 4) es común el uso de técnicas de simulación de procesos, con la finalidad de estudiar diferentes esquemas de interrelación de equipos y procesos. El sistema de simulación en computadora permite el control periódico de todos los indicadores y su registro con facilidad sin necesidad de contratar un especialista. Las recomendaciones derivadas de este diagnóstico se dividen: de corto, mediano y largo plazo, algunas implican modificaciones de tipo tecnológico e inversiones importantes.

## **1.5 Cogeneración**

### **1.5.1 Cogeneración en la industria azucarera**

En el sistema de generación de vapor (Espinosa, 2014), 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 (CONAE, 2011).

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 (Valdés, 1996). Esta cogeneración proporciona beneficios económicos importantes, tales como la reducción de los costos de producción del azúcar, el etanol, hace auto sostenible el proceso industrial y permite crear excedentes que pueden ser vendidos a la red nacional eléctrica.

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<sup>-1</sup> 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 (FAQs, 2017). 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 (Valdés, 1996).

### **1.5.2 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.
- 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 (Espinosa, 2014).

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

1. Motor de combustión interna; 2. Turbinas de gas. (Rendimiento eléctrico entre 20 y 38 %);
3. Turbinas de vapor; 4. Ciclos combinados.

## *Capítulo I*

### *Revisión Bibliográfica*

Aun cuando la cogeneración debe ser evaluada como parte de un plan de administración de energía, su principal pre-requisito 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.

#### **1.5.3 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 (CONAE, 2011).

Existen entonces dos niveles de cogeneración por tratar:

##### 1. 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 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.

##### 2. 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.

#### **1.5.4 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

## Capítulo I

### Revisión Bibliográfica

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 (ESPINOSA, 2016b).

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

- Generación de vapor (Calderas).

La relación: calorías transferidas al vapor/valor calórico superior del bagazo, 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.

En general, la cantidad de vapor producido por unidad de peso del bagazo varía entre 1,80 a 2,75 kg de vapor por kg de bagazo. Frecuentemente se encuentran: 2,25 a 2,50 kg de vapor por kg de bagazo (HUGOT, 1986).

- Generación eléctrica (Turbogeneradores).

El tamaño de la planta eléctrica depende de: la disponibilidad de combustible que se tiene para producir vapor; de la presión y temperatura del vapor a la entrada del turbo generador y del 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. El consumo específico de las turbinas que actualmente operan en los ingenios modernos, oscilan entre 5,49 y 10,88 kg vapor· kWh<sup>-1</sup> (ZANZ, 2014). La Tabla 1.2 reporta de forma general la generación de energía eléctrica por tonelada de caña procesada hasta el momento a nivel mundial.

Tabla 1.2 Valores a nivel mundial de generación de la energía eléctrica por tonelada de caña procesada

Países	Energía eléctrica por tonelada de caña, kWh · t <sup>-1</sup> )
Lousiana	90
Florida	22
Puerto Rico	26 - 28
Cuba	≈ 26 - 30

Fuente: (ESPINOSA, 2016b)

- Evaporación (Cuádruple efecto).

El coeficiente de evaporación de un múltiple efecto en kilogramos de agua por hora y por metro cuadrado de superficie de calentamiento, para una misma caída total de temperatura, y para una misma superficie individual de los cuerpos, es inversamente proporcional al

## *Capítulo I*

### *Revisión Bibliográfica*

número de efectos: El coeficiente de evaporación de un cuádruple de 4 cuerpos de 200 m<sup>2</sup> será los  $\frac{3}{4}$  del coeficiente de evaporación de un triple de 3 cuerpos de 200 m<sup>2</sup>.

Por consecuencia, la evaporación total de un múltiple efecto depende, no de su superficie total, sino de la superficie individual de cada cuerpo.

En promedio y para incrustaciones normales, puede calcularse que la cantidad de agua evaporada por un múltiple efecto de cuerpos iguales, es igual al producto por 100 kg de la superficie individual de los cuerpos.

Si este coeficiente se relaciona a la superficie total de múltiple efecto, pueden tomarse como base los coeficientes de evaporación que se reportan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Coeficientes de Evaporación

Evaporadores	Coeficientes de Evaporación (kg h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> de su superficie total).
Simple efecto	100
Doble efecto	50
Triple efecto	33
Cuádruple efecto	25
Quíntuple efecto	20

Fuente: (HUGOT, 1986)

- Cristalización y cocción (Tachos)

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 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> (HUGOT, 1986).

En Cuba, en tachos de calandria, el mismo autor da finalmente los coeficientes de evaporación, reportados en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Coeficientes de evaporación en Tachos kgm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>

	Máxima	Mínima
Pie de templea	85	17
masa cocida A	71	32
masa cocida B	46	11
masa cocida C	36	1,7

Fuente: (HUGOT, 1986)

En los tachos, si el consumo de vapor se expresa como la relación entre éste y la cantidad teórica de agua que debe evaporarse en la meladura, se verá que esta relación es sensiblemente mayor que la unidad. Esto se debe al agua que se emplea en la dilución de las mieles, al agua de lavado que se usa en las masas cocidas de alto grado y al agua que se emplea para eliminar el falso grano, la suma de las cuales representa una cantidad adicional de agua que debe evaporarse junto con la presente en la meladura.

Según (ESPINOSA, 2016b), los índices asociados al consumo de calor del proceso y a la generación de vapor se comportan como se muestra en la Tabla 1.5 y 1.6 que se muestran a continuación.

Tabla 1.5 Consumo de calor del proceso.

Áreas	% de $Q_{cald}$
Potencia (Turbos y Máquinas. De Vapor)	2 - 5
Tecnológico (proceso)	70 - 80
Condensados	10 - 15
Otros	2 - 4
Pérdidas Totales	hasta el 5%

Tabla 1.6 Índices de generación.

Presión abs	Temperatura (vapor) °C	Kgv·Kgb <sup>-1</sup>
22	340	2,35
33	380	2,29
45	440	2,23
64	490	2,15

### 1.5.5 Herramientas para determinar la eficiencia de los sistemas de cogeneración

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 (GONZÁLEZ, 2016).

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.

### 1.6 Aguas y sistemas de condensados

Teóricamente la caña de azúcar posee en su composición la cantidad de agua necesaria para completar el proceso de fabricación de azúcar. La necesidad de la cantidad y calidad del agua para el proceso está condicionada por razones de estrategia en su uso y de carácter energético. Se exige por tanto, con mucha frecuencia, de agua con más requerimientos y debe trabajarse más fuerte en su acondicionamiento que antes (ICINAZ, 2005).

En el proceso de producción de azúcar, además del producto principal, se obtienen condensados que se generan en diferentes equipos. Estos condensados son analizados para determinar su calidad físico-químico y determinar su destino: tanques de agua para alimentar la caldera y tanques para uso del proceso tecnológico (agua de imbibición, dilución de mieles, lavado en centrifugas y otras) (Motito-Legrá, 2014).

### **1.6.1 Requerimientos de agua en los ingenios**

Todas las necesidades de agua de proceso de las fábricas, es decir, el agua agregada al proceso, debieran suministrarse generalmente por un excedente de condensado. Asumiendo que todo condensado de salida del primer efecto de la evaporación sea retornado a las calderas como agua de alimentación, únicamente una pequeña proporción de condensados provenientes de otras unidades será requerido para la reposición en la alimentación de calderas y el resto estará disponible para uso como agua de proceso. Esta cantidad está afectada por la cantidad condensada en el último efecto, la cual no está disponible para uso en el proceso, es decir, está afectada por la economía de vapor de la fábrica. Mientras mayor sea la eficiencia del vapor de la fábrica, mayor será la cantidad de condensado disponible (REIN, 2012).

- Agua para alcalizado. Se requiere de agua para preparar la lechada de cal. Esta cantidad depende del nivel de densidad o  $^{\circ}\text{Bé}$  requerido para la lechada de cal y de la cantidad de cal utilizada.
- Agua para floculante. El agua ideal para la preparación de floculante no debiera contener especies iónicas, de manera que el condensado es la opción a utilizar. Sin embargo, existe un límite de temperatura que no debiera excederse ya que de lo contrario ocurrirá daño al floculante. Entonces debiera enfriarse el condensado por debajo de  $55^{\circ}\text{C}$ , particularmente cuando se utilicen floculantes de alto peso molecular.
- Agua para el lavado de filtros. Se requiere de un suministro de agua caliente, preferiblemente condensado. La cantidad de agua aplicada varía de fábrica a fábrica pero típicamente estará en el rango de 5 a 10 t de agua por cada 100 t de caña.
- Requerimientos en tachos. Se requiere de condensado caliente para el agua de lavados de centrífugas y para acondicionar las mieles A y B para la alimentación de los tachos. El agua también es necesaria para fundir excedentes de azúcar de bajo grado y para preparar magma para pie de los tachos, aunque algunas veces se utiliza jugo clarificado para estas tareas para mejorar la economía del vapor.

### **1.6.2 Retorno de condensados**

Los condensados son generalmente puros porque han sido evaporados y condensados como agua destilada. Sin embargo, es necesario clasificarlos de acuerdo con su origen:

Las aguas derivadas de la condensación del vapor que viene directamente (cambiadores de calor de vapor vivo), o indirectamente (cambiadores de calor de vapor de escape) de las calderas.

Las aguas originadas del vapor del jugo; condensados del segundo cuerpo y subsecuentes; en un múltiple efecto, de calentadores de jugo o de otros cambiadores de calor calentados con vapor de múltiples efectos.

# Capítulo I

## Revisión Bibliográfica

Las aguas de retornos deberán entonces separarse cuidadosamente en condensados (HUGOT, 1986):

- a) Del vapor directo o de escape;
- b) Del vapor del jugo.

La selección de la mejor calidad de condensado para alimentación de calderas requiere generalmente utilizar el condensado de vapor de escape lo más que se pueda, ya que éste es el más limpio (REIN, 2012).

Por lo que, solo los condensados del primer grupo deben mandarse al tanque de agua de alimentación de calderas.

Los condensados del segundo grupo pueden utilizarse en la imbibición, el lavado de las tortas de los filtros, la dilución de las mieles, etc. Si hay un exceso de ellos es mejor desecharlos y no mandarlos a las calderas (HUGOT, 1986).

### **Conclusiones parciales**

1. La Norma Cubana ISO 50001 para sistemas de gestión de la energía especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía, con el propósito de permitir a una organización contar con un enfoque sistemático para alcanzar una mejora continua en su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía.
2. La cogeneración de energía eléctrica a partir de la quema del bagazo, proporciona beneficios económicos y ambientales.
3. El retorno de los condensados del proceso, la determinación de su calidad para satisfacer las demandas y ser utilizados en las múltiples operaciones que tienen lugar, así como la reducción de sus consumos, influyen significativamente en la eficiencia de las fábricas de azúcar.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

#### **Capítulo II. Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero.**

Uno de los retos principales de la agroindustria cubana de la caña de azúcar es acometer una estrategia integral de modernización y diversificación. Sin embargo, existen elevados consumos de agua y energía, que provocan ineficiencias en el proceso productivo y la pérdida de recursos económicos y financieros. Las principales causas son la mala operación de calderas, el uso inadecuado del vapor en los equipos del proceso, el desaprovechamiento de los condensados e inadecuados sistemas de recuperación, la subutilización de las capacidades propias para la generación de la energía eléctrica y la utilización de un exceso de equipos en relación con los realmente necesarios.

Conocer las condiciones actuales de los esquemas de las fábricas de azúcar requiere la aplicación de un balance termoenergético, pues este puede señalar las dificultades existentes y conducir a economías, evitándose el consumo de combustible adicional, o en caso de sobrante estudiar las formas económicamente más ventajosas de su utilización (Abreu, 2015).

De esta forma se realiza la evaluación del esquema termoenergético del central azucarero “Quintín Bandera”, mediante la aplicación de metodologías de gestión eficiente de la energía y del agua, con el fin de identificar las ineficiencias tecnológicas y proponer alternativas que contribuyan a minimizarlas. El balance termoenergético se aplica según la metodología de (Espinosa, 2019), que constituye la principal actividad de la revisión energética, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns). La evaluación del desempeño energético se sustenta en la implementación de las actividades de la revisión energética según la norma cubana ISO 50001 (2019) para los sistemas de gestión de la energía.

#### **2.1 Metodología de análisis del uso de la energía**

En la primera etapa del procedimiento (Hernández, 2021) se determinan los indicadores reales de desempeño energético de la instalación industrial. El procedimiento se describe a continuación:

- I. Análisis del uso y consumo de la energía.
  1. Confección del esquema gráfico termoenergético que incluye equipos de generación, líneas de distribución de productos intermedios y finales, vapor, vapor secundario, condensados y equipos consumidores.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

2. Registro de las variables de operación medibles de equipos, líneas de vapor, condensado, corrientes azucaradas (presión, temperatura, flujo, concentración).
3. Identificación mediante inspección visual de equipos y sistemas auxiliares con deficiencias en la recuperación del calor, pérdidas de vapor y energía térmica (incluye fugas de vapor y estado del aislamiento, diámetros exteriores y longitud de tuberías de corrientes de proceso, vapor y condensado).
4. Actualización de las especificaciones técnicas de los generadores de vapor, motores primarios y equipos tecnológicos.
5. Confección del esquema de aguas del proceso, que incluye agua cruda para proceso, agua tratada, condensados puros, condensados contaminados y efluentes.
6. Registro y análisis de los consumos actuales (tres meses) y pasados (dos años) de materia prima y recursos energéticos (combustible, electricidad, agua), así como la producción, a través la confección de gráficos y su análisis que implica la identificación de usos significativos de energía mediante diagramas y gráficos de consumo de recursos energéticos y producción.
7. Identificación de las instalaciones, equipamiento, sistemas, procesos y personal que trabaja para, o en nombre de, la organización que afecten significativamente al uso y al consumo de la energía.
8. Determinación del desempeño energético actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía, que implica:
  - Balances de materiales.
  - Balance de vapor: análisis de la distribución del vapor.
  - Balance de agua a calderas: determinación del agua de reposición.
  - Balance de calor: distribución del calor, pérdidas de calor. (Espinosa, 2015)
  - Balance total de agua en la industria. (Rein, 2012).
9. Establecimiento de indicadores para el monitoreo y medición del desempeño energético: consumo de vapor de baja presión % caña, bagazo sobrante % bagazo disponible, generación y consumo específico de electricidad (kWh/tc y kWh/t azúcar), consumo específico de energía (MJ/t caña y MJ/t azúcar) consumo de bagazo por electricidad producida (kgb/kWh), consumo de agua cruda ( $m^3/tc$  y  $m^3/t$  azúcar) y otros que se identifiquen.
10. Análisis de los índices de los indicadores y otros parámetros tales como porcentaje de vapor por válvula reductora, porcentaje de agua de reposición, porcentaje de pérdidas de calor, eficiencia térmica y eficiencia de la generación.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

11. Evaluación comparativa de los indicadores de desempeño energético (IDEns) calculados con los valores de los indicadores nacionales e internacionales.
12. Establecimiento de una línea base energética de la fábrica que represente el comportamiento energético actual y actúe como referencia al momento de implementar el sistema de gestión de la energía (SGE) y oportunidades de mejora; así como la cuantificación de los impactos que esto traerá al desempeño energético.
13. Determinación de los ahorros potenciales (\$/año) a partir de la cuantificación de las pérdidas de recursos monetarios por uso deficiente de los recursos energéticos: \$/ t combustible, III. Identificación, priorización y registro de oportunidades para mejorar el desempeño energético.

II Identificación, priorización y registro de oportunidades para mejorar el desempeño energético.

1. Consulta con directivos y operarios de la fábrica para definir posibles modificaciones al proceso y esquema térmico.
2. Considerar la optimización del esquema integrado material y energéticamente, incluyendo las nuevas producciones.
3. Reajuste del esquema térmico: determinación de los indicadores del desempeño energético.
4. Definición de proyectos de inversión en sistemas del proceso tecnológico y servicios de energía.
5. Estimación de la rentabilidad de inversión basada en beneficios por concepto de ahorro de electricidad, combustible, agua
6. Definición de los objetivos, metas y planes de acción en función de mejorar el uso, consumo y desempeño energético.

Los resultados obtenidos en la integración energética se comparan con los resultados obtenidos en la primera etapa del procedimiento y se define la factibilidad de modificaciones en el proceso. En la segunda etapa están las condiciones dadas para proponer la ejecución de modificaciones prácticas factibles a través de proyectos de inversión basadas en los ahorros potenciales de energía que se logran como resultado de las modificaciones que se identificaron en el análisis del uso de la energía y en la integración de calor.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

#### **2.2 Diagnóstico de primer nivel en el central azucarero**

##### **2.2.1 Descripción general del central azucarero**

La UEB CA “Quintín Bandera”, perteneciente a la Empresa Azucarera Villa Clara del grupo AZCUBA, tiene una norma potencial de 400 000@ de caña (3 600 toneladas de caña /día). Se recibe la materia prima de las Unidades Productoras (UBPC) las cuales se encuentran en un radio de acción de aproximadamente 15 km alrededor del central excepto una que se encuentra a 50 km de la fábrica. La fábrica es totalmente eléctrica y se procesa caña de corte mecanizado en su totalidad por transporte automotor (65%) y por ferrocarril (35%). Se comercializan azúcar refino C de alta calidad con insumo propio y de centrales como UEB “Panchito Gómez Toro” y Subsistema Sitiecitos. Además comercializa la miel final B que se obtiene como coproducto a la Empresa Tecno Azúcar y Porcino para ser utilizadas por otras fábricas que la necesiten para su producción y como suplemento animal, además se entrega cachaza y energía eléctrica al Sistema Electroenergético Nacional.

La fábrica está estructurada en diferentes áreas de trabajo, estrechamente vinculadas entre sí a fin de garantizar el correcto y estable funcionamiento del proceso tecnológico: área de Basculador y Tándem; Generación de Vapor; Fabricación; Planta Eléctrica; Laboratorio; Mantenimiento Integral, además cuenta con el Taller de Maquinado, Instrumentación y Centro de Acopio.

Se realiza el registro y análisis de la información de la industria de la zafra del 2021-2022 tomada de un mes de operación estable. En la figura 2.1 se muestra el comportamiento de la energía eléctrica en 10 días de operación. Esta información permite determinar indicadores de consumo energético con relación a la electricidad (kWh/t azúcar).

## Capítulo II

### Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero

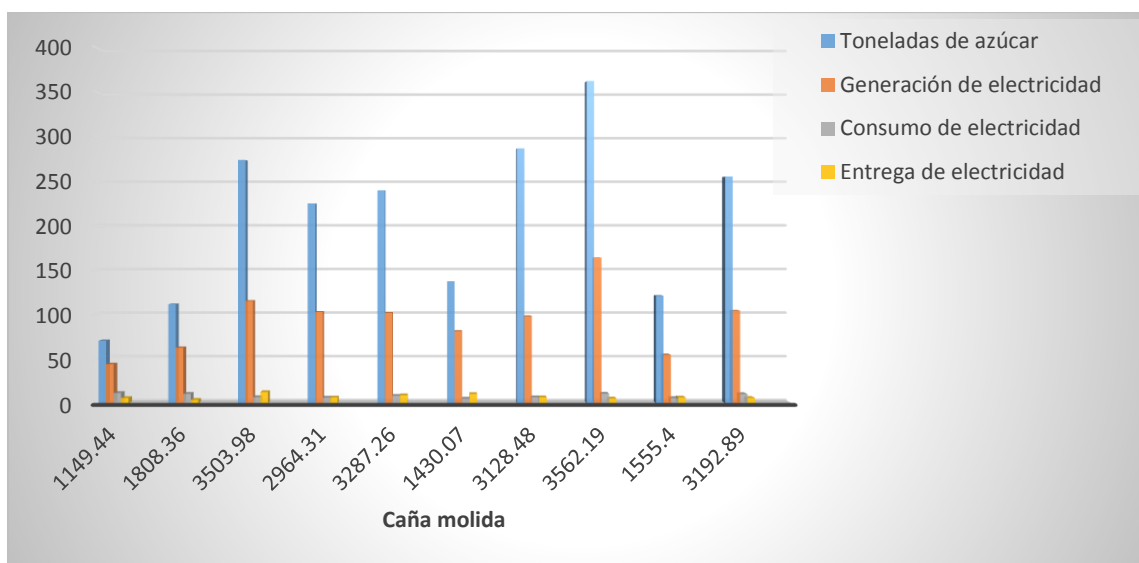


Figura 2.1. Comportamiento de la producción de azúcar, generación, consumo y entrega de electricidad.

#### 2.2.2 Inversiones precedentes en el esquema tecnológico actual en la empresa azucarera.

La empresa azucarera “Quintín Bandera” después de 10 años de paralización de la producción de crudo, en los cuales sólo se llevó a cabo la refinación del azúcar, utilizando el crudo y el bagazo tributados por otras empresas como la UEB “Panchito Gómez Toro” y Subsistema Sitiecitos, fue sometida en el año 2015 a un proceso inversionista para reiniciar la molienda de la caña. Entre las mejoras que incluyó en el esquema energético se encuentran:

- ✓ Remodelación y activación de 2 calderas, con el cambio de un haz de tubos, la ampliación del área de apantallamiento del horno, montaje del sobrecalentador, economizador, calentador de aire, ventiladores de tiro inducido (VTI), ventiladores de tiro forzado (VTF) y ventiladores de aire secundario (VTS). Además se incluyó en esta activación el montaje de lanzadores neumáticos y la automatización de cada una de las calderas.
- ✓ Se aumentó el apantallamiento de la caldera bagacera, en activo (Nº1), durante las campañas de refinación y se le montó un VTI adecuado a su capacidad actual.
- ✓ Se montó una Planta de Tratamiento de Agua, con todo el equipamiento requerido para obtener un agua tratada con los parámetros de calidad que se requieren.

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

- ✓ Se presurizaron los tanques de alimentación de agua a las calderas y se montaron 2 bombas nuevas para esta operación.
- ✓ Se sustituyó un turbogenerador de 1,5 MW en mal estado por uno de 4MW (ruso) y se automatizó la operación de la Planta Eléctrica.
- ✓ Se aumentó la capacidad del banco de enlace con el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) a 3 200kVA, 33 a 6,3kV.
- ✓ Existe un calentador de jugo clarificado para calentar el jugo mezclado y un calentador (Honolulu) para el licor.
- ✓ Se aislaron con lana mineral y recubrimiento protector de aluminio algunas de las tuberías de vapor directo, agua y fluidos calientes, así como algunos de los equipos tecnológicos.

#### **2.2.3 Descripción del proceso de fabricación de azúcar crudo por etapas**

El proceso de fabricación de azúcar crudo consta de las siguientes operaciones básicas: La materia prima para la fabricación de azúcar crudo es el tallo sano de la caña de azúcar libre de materia extraña y tierra. La materia prima tiene que satisfacer un conjunto de requisitos mínimos de calidad para que la industria al procesarla adecuadamente, sea capaz de desarrollar una producción estable con calidad y eficiencia.

##### - Preparación de la caña

Es la primera operación que se realiza en la fábrica y tiene como funciones fundamentales recibir y transportar la caña hacia el molino y preparar la caña para la molienda. El grado de preparación se mide por % de celdas rotas, de la masa fibrosa al salir de los equipos de preparación; se considera ya una buena preparación cuando se alcanza un 85 % de celdas rotas, y un óptimo cuando oscila en el rango de 90 a 92 %. En esta operación se debe velar por garantizar una descarga de la caña a la estera alimentadora sin vacíos ni colmos, lo cual permita mantener un colchón con la altura prefijada entrando a las cuchillas. Los vacíos provocan una caída considerable en el índice de preparación ya que al entrar a las cuchillas un colchón bajo estas no pueden preparar correctamente la caña, y los colmos pueden provocar atoros en las cuchillas que en ocasiones provocan la paralización del proceso.

Para la preparación de la caña consta con una doble estera transportadora con cuchillas tipo diente de sierra.

##### - Extracción del jugo

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

El tándem es una de las áreas de mayor importancia dentro de la industria porque en ella se realiza la extracción del guarapo a la caña, por lo que su trabajo es el punto de partida del balance de masa y energía de la fábrica.

Las funciones de un tándem son moler la cantidad de caña normada, extraer el máximo contenido de Pol que tiene la caña y entregar el bagazo para combustible de las calderas y la producción de derivados. La eficiencia se evalúa a partir de la extracción de Pol y de jugo mezclado. Resulta decisiva para la eficiencia global del proceso pues lo que el tándem no sea capaz de extraer se va a las calderas con el bagazo e irremediablemente se pierde. El área de molinos cuenta con 5 molinos, balanceados hasta obtener un Pol del bagazo por debajo de 2,0. Se añade agua de imbibición al 25% del peso de la caña y se garantiza un Brix del jugo mezclado por debajo del 14,5. Un colador rotatorio y 2 bombas Allis Chalmer de guarapo mezclado envían el jugo al área de fabricación.

- Generación de vapor

El bagazo que sale del último molino de la planta moledora va hacia las calderas y se usa como combustible para generar el vapor necesario para el proceso de fabricación del azúcar. Debe tener una humedad de 48-50% y una relación fibra dura de aproximadamente uno, para que la combustión sea adecuada. Del bagazo total que se obtiene, una parte pasa a producir todo el vapor necesario en la fábrica y queda un excedente para ser usado en las paradas de la fábrica y durante los días de limpieza química.

- Purificación de Jugos

El objetivo de la purificación es remover los no azúcares que contiene el jugo extraído para posibilitar la máxima recuperación de azúcar de alta calidad y evitar las incrustaciones en los equipos de transferencia de calor, no obstante, aún no se ha logrado la total eliminación de los no azúcares durante la purificación. Está compuesta por las etapas siguientes etapas:

1. Calentamiento: Es la operación que se lleva a cabo para suministrar el calor suficiente al jugo mezclado para elevar su temperatura desde 40 °C hasta 103 °C – 106 °C. Puede llevarse a cabo en etapas conocidas como calentamiento primario y rectificador. Con independencia del diseño, el esquema de uso del vapor y el esquema de limpieza debe operarse de forma tal que la superficie de transferencia siempre esté desincrustada. Específicamente el área cuenta con 5 calentadores (3 primarios y 2 rectificadores), hasta alcanzar una temperatura de 105 °C.

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

2. Alcalización: Se denomina alcalización al proceso mediante el cual se encala el guarapo, por medio de la adición de lechada de cal diluida, en una proporción que va desde 500 y hasta 650 g de CaO por tonelada de caña molida, o de sacarato, preparado previamente por medio de meladura y lechada de cal concentrada. Este proceso de encalamiento se puede realizar de una vez, en frío o en caliente o en dos etapas, o una pre alcalización en frío con la rectificación en caliente. Esta forma se denomina fraccionada y es por sus resultados la más utilizada por los ingenios.

La cal utilizada para la alcalización, se prepara en una Planta de cal (en área del ingenio), donde se utilizan los sacos de cal hidratada y se prepara la lechada de cal con un baumé entre 4-6, en tanques que abastecen la fábrica, por 24h. Luego de éste procedimiento el jugo pasa al tanque flash, donde iguala su temperatura a 100 °C, hasta garantizar un pH entre 7,5 y 7,6 para posteriormente ingresar al clarificador a temperatura constante.

3. Clarificación del jugo: La clarificación del jugo es la operación de ingeniería a la que se somete el jugo en los clarificadores, después de alcalizado, para completar la reacción de formación y sedimentación de los flóculos de fosfato tricálcico y lograr una perfecta separación en dos fases, la primera jugo claro y la segunda cachaza. Para ello se utiliza un clarificador tipo BTR (bajo tiempo de retención) y se le añade floculante de sedimentación (sukerflow 400), previamente preparado en una estación de floculante. De esta forma se formarán los flóculos de fosfato tricálcico, que arrastrarán las impurezas que contiene el guarapo, dejando de esta forma un jugo claro y brillante (pH 6,9-7,2).

Los lodos del clarificador, son llevados a un mezclador donde se le adiciona bagacillo como medio filtrante, en proporción suficiente como para formar una torta con buenas propiedades físico mecánicas. El proceso de agotamiento de la torta se lleva a cabo en los filtros rotatorios al vacío.

El contenido de bagacillo en la mezcla debe estar en el orden de los 6 a 8 kg por toneladas de caña, lo que representa de un 10 a un 15 % en peso de la torta.

Estos lodos se caracterizan por tener un pH de 6,0 a 6,7 y una relación sólido líquido del orden del 50 %. Su proporción es del orden del 18 al 29 % en relación con la caña.

Por su parte de la parte inferior del clarificador, se extrae la cachaza formada y pasa a la etapa de filtración, para tratar de agotar la misma y extraerle la mayor cantidad de jugo posible

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

4. Filtración de la cachaza: Para ello se utilizan 2 filtros de 10x20, en los cuales se prepara una torta de cachaza, previamente ligada con bagacillo y se le adiciona agua condensada contaminada caliente, a 75 °C, para agotar lo más posible la torta de cachaza. Debe mantenerse este valor de temperatura y controlar su volumen para que la dilución del jugo de los filtros no sobrepase el 25 %. De esta operación se obtiene, cachaza y jugo filtrado. La cachaza agotada sale con una Pol por debajo de 3,20 y se carga en carretas para utilizarse como fertilizante en el campo.

El jugo de los filtros retorna al tanque de mezclado directamente. Es posible clarificarlo de forma independiente, este proceder mejora mucho el área de purificación y condiciona una mejor eficiencia, pues con esta tecnología se eleva considerablemente su pureza y se logra aproximar a la del jugo clarificado. Luego se decide en función de su calidad si puede correrse hacia los evaporadores o se retorna hacia el tanque de jugo mezclado.

- Evaporación de los jugos

La estación evaporadora es la responsable de concentrar el jugo y convertirlo en meladura por la acción del vapor bajo el principio del múltiple efecto. Se define como el centro del balance energético de los ingenios, pues esta estación recibe vapores de escape de alta presión y entrega vapores vegetales a calentadores y tachos; por ello su operación, limpieza y mantenimiento están estrechamente vinculados a la eficiencia energética del proceso.

- Los ingenios productores de azúcar de caña se balancean energéticamente a partir de los esquemas de evaporación y calentamiento adecuados a los esquemas de producción establecidos, con consumo de vapor del orden del 38% al 49 % en peso de la caña. Ello se debe a que la estación es la responsable de evaporar entre el 70 % al 75 % del agua presente en el jugo clarificado, lográndose con este proceso concentrar el jugo desde 15,5 hasta 60 - 65 °Bx. Primeramente se vuelve a calentar en el calentador de jugo clarificado para que alcance la temperatura correspondiente a la presión de ebullición del primer efecto, y de esta forma sea más eficiente el proceso.

Se utiliza un cuádruple efecto de 61 400 PCSC. Este equipo consta de un primer Vaso de 32 400 PCSC, que se comporta como un pre-evaporador y suministra vapor de jugo hacia el área de tachos de crudo y de refino. Por su parte el segundo Vaso de 12000 PCSC, tiene extracciones para los calentadores primarios. El tercer y cuarto vasos concentran la meladura que pasa a la etapa de Cristalización y Cocción.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

#### - Cristalización y Cocción

Los tachos reciben la meladura concentrada por los evaporadores y a partir de una secuencia de operaciones básicas de ingeniería producen la semilla necesaria para la fabricación del azúcar granulado. Estas operaciones en los tachos tienen como fin concentrar los materiales que se les alimentan hasta un nivel de sobresaturación tal que permita un rápido crecimiento de los granos, agotar progresivamente los materiales mediante una operación por etapas y lograr como producto final un azúcar granulado de tamaño tal que cumpla los requisitos normados. El esquema de trabajo que se adopte en los tachos deberá garantizar además del cumplimiento de las especificaciones de calidad del azúcar, el agotamiento de las mieles intermedias y final.

El esquema establecido en la UEB es el de dos masas cocidas: A y B; se cristaliza para la masa cocida B, esta es purgada y la semilla B se utilizará en la elaboración de la masa A, la cual será purgada y se obtiene la azúcar comercial. Se utilizan 5 tachos: 2 para hacer MCA, uno para hacer MCB, uno para cristalizar para segunda, y uno para coger y preparar la semilla de la MCB. También dos cristalizadores de MCB, un cristizador de MCA, un granero de semilla, un granero de grano virgen de MCB, un granero de grano mejorado de MCB, un tanque de meladura, un tanque de sirope, un tanque de miel A y un tanque de miel B.

Se cristaliza para 6 masas cocidas B y se fabrican las mismas con la cristalización de la miel A (obtenida de la purga de la MCA). Esta MCA se purga en 4 centrífugas continuas, del tipo ACW-1000 f, donde se obtiene la semilla (azúcar muy fina) y la miel B. La miel B se envía hacia el tanque de miel B, fuera de la fábrica. La semilla se forma en un tacho, se limpia, se prepara y es la base para elaborar las MCA, donde se va alimentando el grano con Meladura hasta obtener el tamaño requerido. Las masas se bombean desde los cristalizadores hacia las centrífugas discontinuas del tipo ASEA 650, donde se obtiene la Miel A que se reincorpora al área de tachos y el azúcar que va hacia el granel.

Este es el sistema que se utiliza en la UEB debido a que en la activación del central no se fabricó ni montaron todo el equipamiento tecnológico para llevar a cabo el sistema de tres masas, se trabaja para su implementación en próximas reparaciones. Este esquema de tres masas cocidas sin recirculación de miel, usando la masa B como doble semilla, garantizará un mayor agotamiento de las mieles y la alta calidad del

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

azúcar crudo con la particularidad de obtener un grano del mismo tipo, tamaño y características.

#### - Centrifugación

Es la última operación básica del proceso de producción de azúcar crudo, en los casos en que se comercializa sin secarse. El área recibe la masa cocida de los tachos, la acondiciona en los mezcladores para posteriormente someterla a un proceso de centrifugación para separar los granos de azúcar producidos de su licor madre. Las centrifugas retornan hacia los tachos además del azúcar "B" y "C", mieles "A" y "B", libres de granos para continuar su proceso de agotamiento escalonado. Como producto agotado la miel final va hacia los tanques de almacenamiento.

En el área de centrifugación hay 4 centrifugas ACW-1000f (continuas), para la MCB y 5 centrifugas ASEA 650, con una capacidad de 650 KG en cada carga, para la MCA. El azúcar A obtenida se traslada por medio de sinfín, elevador y conductor de Banda, hacia el granel de azúcar crudo, donde se utilizará para disolverse y ser utilizado en el proceso de refinado. Este azúcar tiene una calidad aproximada de POL= 99,20, COLOR: 12 UCH RED: 0,20.

Esta área tecnológica en la cadena de producción tiene una función compleja, pues entrega azúcar y miel final como productos aptos para la comercialización y además retorna al proceso aquellos productos intermedios que pueden ser agotados aún, de forma que si su operación no es la adecuada entonces se rompe este equilibrio y se puede afectar todo el trabajo de purificación, evaporación y tachos.

#### **2.2.4 Caracterización del esquema energético**

El área de generación de vapor dispone de cuatro generadores de vapor (calderas), con las características que se muestran en la Tabla 2.1. Sin embargo durante el proceso sólo son utilizadas tres calderas, la cuarta es de petróleo y se utiliza para el período inactivo.

Tabla 2.1 Características de las Calderas

Nº	Presión Vapor kg·cm <sup>-2</sup>	Temp. Vapor °C	Producción th <sup>-1</sup>	Temp. Agua °C	Temp. Gases °C	Observaciones
1	17,0	320	50	115	180	B y W Modelo 32 remodelada a Retal (bagazo)

*Capítulo II*

*Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central  
azucarero*

2	17,0	320	40	115	180	B y W con petróleo para inactivo
3	17,0	320	50	115	180	PQS 1ra generación (bagazo)
4	17,0	340	55	115	180	Retal con apantallamiento del horno (bagazo)

La caldera Retal dispone de, parrilla basculante para la quema de bagazo en suspensión, sobrecalentador, economizador, calentador de aire, tiro balanceado (VTI, VTF y VAS).

El área de Generación de Vapor tiene una Planta de Tratamiento Químico del agua de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , un sistema de almacenamiento de bagazo y una estación picadora con un dosificador de Residuos Agrícolas Cañeros (RAC) y los correspondientes conductores para el trasiego de biomasa hasta las calderas.

El vapor directo generado a una presión de  $17,0 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  es suministrado a tres turbogeneradores de contrapresión: dos de 2 de 4 MW y uno de 2 MW.

Dos válvulas reductoras de presión acondicionan el vapor al proceso; una de  $17,5/10,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  para vapor al secador de azúcar, escobas y otros usos; y dos reductoras de  $10,5/1,1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  para completar la demanda del proceso, las mismas tienen atemperamiento. El ingenio está totalmente electrificado con un consumo de generación propia de aproximadamente 6 000 kWh.

El esquema de calentamiento está conformado por tres calentadores primarios de los cuales siempre se encuentran trabajando dos y uno de limpieza rotativamente, dos rectificadores y un calentador de jugo clarificado. Los primarios utilizan vapor proveniente de extracciones del segundo efecto evaporador, y el resto con vapor de escape.

El sistema de evaporación representa un cuádruple efecto, trabaja con vapor de escape de 15 lbs obtenido de los turbogeneradores y trabaja el último vaso al vacío (con 25" de Hg). El primer efecto está formado por dos vasos que se consideran el pre-evaporador, el segundo efecto por dos vasos, el vapor del segundo alimenta el tercero (tercer efecto), y el vapor proveniente del tercero al vaso cuatro (cuarto efecto). El agua de retorno de los tres primeros efectos que constituyen el esquema se utiliza para alimentar calderas (la no contaminada) y para todo el proceso de fabricación (la contaminada). El esquema de evaporación instalado (esquema Bauzá) es muy eficiente al combinar las bondades probadas de un triple efecto a presión de  $1,1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  de vapor



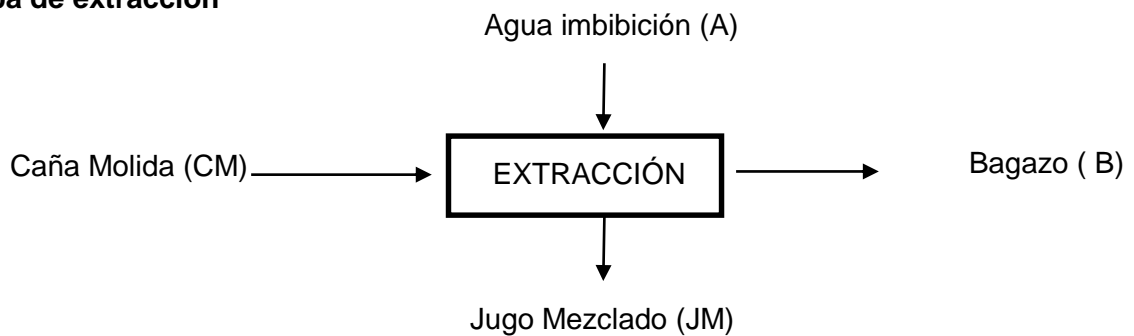
2.2.5 Balance de Materiales

Tabla 2.2 Datos generales de fábrica

Datos de fábrica	Valor
Caña Molida (CM) ,kg/h	77 400,00
Bagazo % de caña,%	36,537
% Extracción en molinos,%	95,2
Agua de imbibición % de caña,%	26
Cachaza % de caña,%	3,9
Lechada de cal,%	2 % JM
% de humedad del bagazo,%	50,58
% jugo filtrado,%	18 % del JM

Un valor adecuado del °Bx del jugo mezclado debe oscilar entre 13 °Bx y 15 °Bx. Atendiendo a la clarificación no debe ser superior a los 15 °Bx, debiéndose aplicar más agua para no sobrepasar este valor. Por otra parte, el agua se debe reducir si el °Bx es inferior a 13 °Bx. La cantidad de agua de imbibición está condicionada a obtener, como mínimo, entre 60 y 62 grados °Bx en la meladura, manteniendo la limpieza y operación correctas en la planta de evaporación.

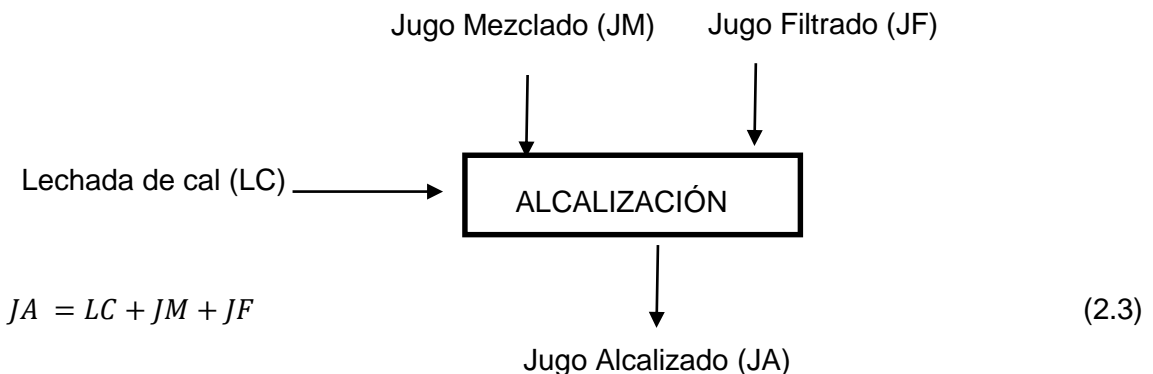
Etapa de extracción



$$CM + A = B + JM \tag{2.1}$$

$$JM = CM + A - B \tag{2.2}$$

Etapa de alcalización



$$JA = LC + JM + JF \tag{2.3}$$

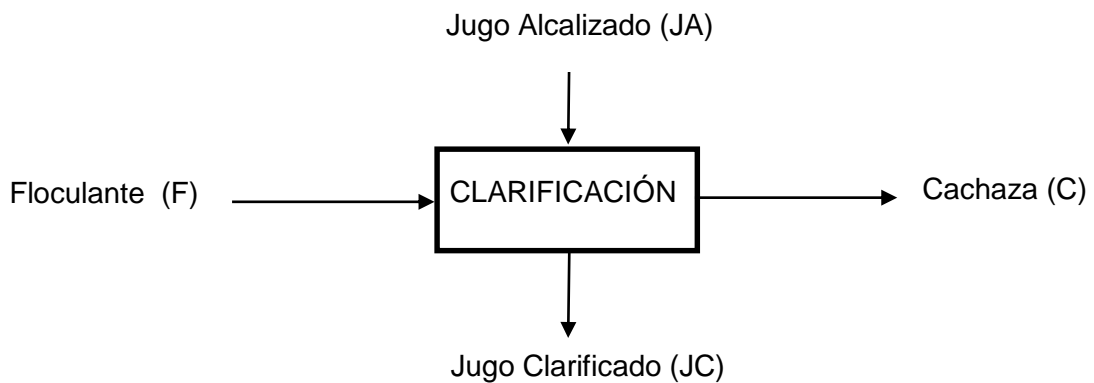
## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

donde:

$$JF = (15 - 20 \%) JM \quad (2.4)$$

#### **Etapa de clarificación**



$$JC = F + JA - C \quad (2.5)$$

Donde:

$$F = 5\% CM \quad (2.6)$$

Los resultados obtenidos en el balance de masa se registran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resultados del balance de materiales

Corrientes del proceso	Valor
Jugo Mezclado	68 613,552
Bagazo	28 279, 638
Jugo Alcalizado	80 277,856
Jugo Clarificado	77 869,520
Cachaza	3 018,600

#### **2.2.6 Balance de energía**

El balance de energía incluye el balance de vapor, el balance de condensados y el balance de calor en los equipos del proceso, a partir de los datos y mediciones reales del proceso y los resultados del balance de masa. La tabla del Anexo 2 registra los datos utilizados en el balance, correspondientes a las propiedades de las corrientes en los equipos tecnológicos.

El consumo de vapor en los calentadores ( $G_{cal}$ ) se determina por la ec. (2.7)

*Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

$$G_{CAL} = \left[ \frac{S_j * C_p * (t_s - t_s)}{h_v} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

- Consumo de vapor en los pre evaporadores en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $S_j$ : Flujo de jugo determinado en el balance de materiales en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $C_p$ : Calor específico del jugo en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$

$$C_p = 1 - 0,056Bx_e \quad (2.8)$$

- $t_s$ : Temperatura de salida del jugo en  $\text{°C}$
- $t_e$ : temperatura de entrada del jugo en  $\text{°C}$
- $h_v$ : Calor latente del vapor utilizado en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Consumo de vapor de escape en pre-evaporadores:

El vapor de agua es el agente portador de la energía térmica convertida en mecánica en las máquinas de vapor o turbinas. Parte de la energía del vapor utilizado por la máquina o turbina se transforma en energía mecánica y el resto sale con el vapor de escape, donde se convierte en agua caliente condensada, que se utiliza para alimentar la caldera, o sea reponer el agua evaporada. También se utiliza el vapor de escape para calentamiento y evaporación, en general para suplir necesidades tecnológicas del proceso.

$$G_{PRE} = \left( W * \frac{h_c}{h_v} + \left[ \frac{JC * C_p * (t_b - t_f)}{h_v} \right] \right) * \emptyset \quad (2.9)$$

$$W = JC * \left( \frac{BxJC}{BxJC1} \right) \quad (2.10)$$

Siendo:

- $G_{pre}$ : Consumo de vapor en los pre evaporadores en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $W$ : Vapor de jugo a tachos y calentadores (Productividad) en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $h_c$ : Calor latente del vapor en el cuerpo en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$
- $h_v$ : Calor latente del vapor en la calandria en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$
- $JC$ : Flujo de jugo clarificado en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$  (del balance de masa)
- $C_p$ : Calor específico del jugo en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$
- $t_b$ : Temperatura de ebullición en  $\text{°C}$
- $t_f$ : Temperatura del jugo alimentado en  $\text{°C}$

Consumo de vapor en el cuádruple efecto con extracciones

$$G_{EVAP} = \left[ W_1 * \frac{h_{cu}}{h_{vc}} + \frac{JC * C_p * (t_{eb} - t_a)}{h_{vc}} + \frac{n-1}{n} * E_1 + \frac{n-2}{n} * E_2 + \frac{1}{n} * E_n \right] \quad (2.11)$$

*Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

$$W_1 = \frac{S_{JC}}{n} - \frac{S_{JC} * \left(1 - \frac{Bxe}{Bxs}\right)}{n} \quad (2.12)$$

Donde:

- $G_{\text{evap}}$ : Consumo de vapor en los evaporadores en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $W_1$ : Productividad total en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $n$ : número de efectos
- $JC$ : Flujo de jugo clarificado en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
- $Bxe$ : Concentración a la entrada del múltiple en  $^{\circ}\text{Bx}$
- $Bxs$ : Concentración a la salida del múltiple en  $^{\circ}\text{Bx}$
- $h_{cu}$ : Calor latente de vapor en el cuerpo del 1er efecto en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$
- $h_{vc}$ : Calor latente de vapor en la calandria del primer efecto en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$
- $C_p$ : Calor específico del jugo en  $\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
- $t_{eb}$ : temperatura de ebullición del primer cuerpo en  $^{\circ}\text{C}$
- $t_a$ : temperatura de la alimentación en  $^{\circ}\text{C}$
- $E_1, E_2, \dots, E_n$  extracciones realizadas en los efectos en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$

Consumo de vapor en tachos de crudo y refino

El consumo de vapor se determina fundamentalmente por los equipos y los procedimientos que se utilizan en la estación de evaporación, calentadores y tachos; de esta forma la economía en el combustible es un problema de uso de vapor y no de la eficiencia de las calderas. Esta reducción en el consumo de vapor puede significar una reducción en las instalaciones de calderas requeridas, y por consiguiente un ahorro en el costo de instalación e inversión.

La demanda total de vapor en los tachos se determinó mediante la ecuación 2.13.

$$G_{TOTAL\ TACHO} = \sum_{i=1}^n G_{TACHOS} \quad (2.13)$$

Siendo:

- $G_{\text{tacho}}$ : Demanda de vapor en tachos en  $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$

El gasto de vapor total en cada tacho se calcula como:

$$G_{TACHO} = \frac{W_{INICIAL} - W_{FINAL}}{T_0} * \delta \quad (2.14)$$

Donde:

- $T_0$ : Tiempo de cochura de la templa en h
- $\delta$ : Coeficiente que tienen en cuenta las pérdidas al medio, en dependencia del tipo de masa cocida, adoptándose. Según (Espinosa, 1991):
  - ✓  $\delta = 1,3$  masa cocida C
  - ✓  $\delta = 1,2$  masa cocida B

## Capítulo II

### Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero

✓  $\delta = 1,1$  masa cocida A

$$W_{INICIAL(FINAL)} = P_{INICIAL(FINAL)} * \left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_2}\right) \quad (2.15)$$

Siendo:

- $W_{INICIAL(FINAL)}$ : Masa de agua evaporada en kg
- $Bx_1$ : Concentración inicial del material en °Bx
- $Bx_2$ : Concentración final de la masa cocida en °Bx

$$P_{INICIAL(FINAL)} = \gamma * V_{INICIAL(FINAL)} \quad (2.16)$$

Donde:

- $P_{INICIAL(FINAL)}$ : Masa del material inicial (final) o pie de templa en kg
- $V_{INICIAL(FINAL)}$ : Volumen inicial (final) del tacho en m<sup>3</sup>
- $\gamma$ : Peso específico del material (1 450 kg·m<sup>-3</sup>) según (Hugot, 1986) y (Espinosa, 1991), como el valor promedio de acuerdo con la pureza y el °Bx de los materiales alimentados.

$$P_{MAT} = (P_{FINAL} - P_{INICIAL} - W_{INICIAL}) * \frac{Bx_2}{Bx_3} \quad (2.17)$$

$$W_{MAT} = P_{MAT} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right) \quad (2.18)$$

Siendo:

- $P_{FINAL}$ : Masa del material final en kg
- $V_{FINAL}$ : Volumen final de la templa en m<sup>3</sup>
- $Bx_2$ : Concentración del material alimentado (meladura o miel) en °Bx
- $W_{MAT}$ : Cantidad de agua evaporada en el material a alimentar en kg

Consumo de vapor de escape

$$G_{NT} = G_{calent.jugo\ claro} + G_{calent.rectificadores} + G_{preevaporador} + G_{efecto2} + G_{efecto3} \quad (2.19)$$

Siendo:

- $G_{NT}$ : Consumo de vapor de escape en kg·h<sup>-1</sup>
- $G_{calentador\ de\ jugo\ claro}$ : Consumo de vapor en calentador de jugo claro en kg·h<sup>-1</sup>
- $G_{calentador\ rectificador}$ : Consumo de vapor en calentadores rectificadores en kg·h<sup>-1</sup>
- $G_{pre}$ : Consumo de vapor en los pre evaporadores en kg·h<sup>-1</sup>
- $G_{efecto\ 2}$ : Consumo de vapor en el segundo efecto evaporador en kg·h<sup>-1</sup>
- $G_{efecto\ 3}$ : Consumo de vapor en el segundo efecto evaporador en kg·h<sup>-1</sup>

Las turbinas de vapor basan su funcionamiento en la transformación de la carga de presión que trae el vapor en energía cinética y ésta a su vez en trabajo de eje. El turbogenerador no es más que una turbina de vapor que utiliza su fuerza impulsora o trabajo de eje en mover un generador eléctrico.

*Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

Para el cálculo del consumo de vapor del turbogenerador ( $G_{TG}$ ) aplica la ecuación 2.20.

$$G_{turbogeneradores} = \frac{860 * N_T}{H_0 * \eta_t * \eta_m * \eta_{eléctrica} * \eta_{tuberías}} \quad (2.20)$$

Donde:

- $C_{TG}$ : Consumo de vapor del turbo en  $kg \cdot h^{-1}$
- $H_0$ : Diferencia de entalpía entre el vapor a la entrada de la turbina y después de la expansión ideal en  $kcal \cdot kg^{-1}$
- Módulo 860: conversión de kWh a kcal
- $N_T$ : Potencia real del turbo en kWh
- $\eta_t$ : eficiencia termodinámica
- $\eta_m$ : Eficiencia mecánica (0,98)
- $\eta_{eléct}$ : Eficiencia eléctrica (0,90–0,94)
- $\eta_{tub}$ : Eficiencia de la tubería (0,90)

La demanda de vapor por reductora se calcula desde 17,5 hasta 10,5  $kg \cdot cm^{-2}$

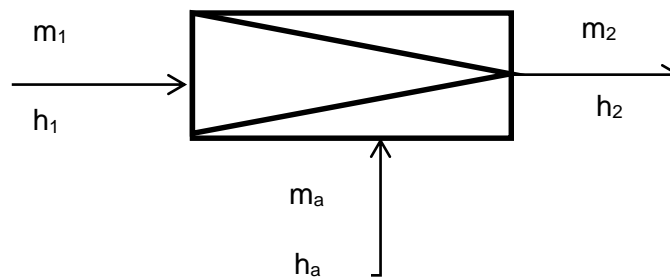


Figura 2.2 Esquema de la válvula reductora atemperadora de 17,5/10,5  $kg \cdot cm^{-2}$

✓ Consumo de la reductora

$$G_{VR} = G_{tecn} - G_{MP} \quad (2.21)$$

**2.2.7 Demanda de vapor del proceso**

La demanda de vapor a consumir por el proceso ( $G_{cal}$ ) está constituido por el consumo de los turbogeneradores ( $G_{MP}$ ), la válvula reductora ( $G_{VR}$ ) y otros consumidores de vapor de alta presión.

$$G_{cald} = (G_{MP} + G_{VR} + G_{otros}) * X \quad (2.22)$$

Consumo de Gotros:  $Gotros = 0,05 * G_{MP}$

Índice de generación de las calderas

*Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

$$IG_{bruto} = \frac{D_{total}}{B}, \text{ en } \frac{kg_{vapor}}{kg_{bagazo}} \text{ ó } \frac{t_{vapor}}{t_{bagazo}} \quad (2.23)$$

**2.2.8 Balance de condensados**

El condensado formado en las superficies de intercambio de los equipos tecnológicos es igual a la cantidad de vapor consumido por el equipo en cuestión. Los condensados de mayor interés en el proceso son los condensados calientes y los condensados puros para alimentar las calderas.

Cantidad de condensados a calderas

a) Pre- evaporadores

$$D_{condensados} = G_{preevaporadores} \quad (2.24)$$

b) Múltiple efecto (cuádruple efecto)

$$D_{condensados} = G_{V2} + G_{V3} \quad (2.25)$$

c) Calentadores

En estos equipos por cuestión de seguridad se escogen los calentadores de jugo clarificado y los calentadores rectificadores

$$D_{condensados} = G_{CJC} + G_{CR} \quad (2.26)$$

d) Tachos de Crudo

En el balance de condensados para calderas, se consideran solo los tachos para las necesidades propias de este proceso, como son: lavado de centrifugas, disolución de azúcar crudo y lavado de filtros.

En dependencia de este balance de condensados se determina la cantidad de agua de reposición (tratada) a complementar, dada por la diferencia entre la demanda de condensados puros de las calderas y la disponibilidad de los mismo en el proceso.

**2.2.9 Determinación de los indicadores de desempeño energético**

La determinación de los principales indicadores de desempeño energético depende de los resultados de la aplicación de la metodología del balance termoenergético (balance de vapor, balance de materiales, balance de agua y balance de calor), el cual aporta los valores de demanda total de vapor del central, demanda de agua de reposición y la potencia térmica requerida en el proceso, relacionados con la molienda de caña, producción de azúcar y la electricidad (generación, entrega y consumo).

**Conclusiones parciales**

1. El procedimiento adoptado para el análisis del uso y el consumo de la energía en la industria enriquece las actividades normadas para los sistemas de gestión de la energía.

## *Capítulo II*

### *Procedimiento para el análisis del uso de la energía en el central azucarero*

2. El diagnóstico energético permite caracterizar el proceso de fabricación, con el fin de esclarecer las necesidades energéticas en el esquema actual.
3. Los indicadores de desempeño energético constituyen una herramienta de uso sistemático para el control del proceso y evaluación de la eficiencia.

**Capítulo III. Análisis del desempeño energético del central azucarero**

Para mejorar la eficiencia y ahorrar combustible en la industria azucarera existen diversas vías, entre las cuales se pueden mencionar el estudio del sistema actual para la introducción de mejoras que determinen una mayor eficiencia del sistema energético, los cambios para alcanzar una mayor utilización del calor y vapor con vistas a la optimización, y la sustitución de equipos de baja eficiencia térmica por otros de mayor eficacia.

**3.1 Análisis de los resultados del balance energético**

Como resultado de la metodología descrita en el capítulo 2 para la evaluación energética, se obtuvieron los consumos de vapor de los equipos tecnológicos, la distribución de la energía en el proceso y los indicadores de desempeño energético para la zafra objeto de estudio. En la tabla 3.1 se exponen los consumos obtenidos en los equipos del proceso tecnológico de generación de vapor.

Tabla 3.1 Consumo de vapor de los equipos del proceso

Equipo	Consumo de vapor (kg/h)
Calentadores rectificadores	1 224, 702
Calentador de jugo clarificado	1 410, 058
Primer efecto pre-evaporador(3 vasos)	29 575, 504
Segundo efecto(2 vasos )	11 164, 923
Tercer efecto	23 880, 410

La demanda de vapor del proceso (Gcal) tiene un valor de 117 648, 6 t/h que representa el 75 % de la generación y el 25 % debe ser consumido por la refinería de azúcar crudo.

- Balance de condensados

En cuanto al balance de condensados e asume que el vapor total consumido (Gcald) es igual al condensado total del proceso (Gacald). En esta industria se consideran condensados puros los procedentes de los tres primeros efectos, calentador de jugo clarificado y rectificador de jugo mezclado.

Tabla 3.2 Resultados del balance de agua

Gacal	117 648,595 kg/h
Gcond puros	80 261,563 kg/h
Gareposic	37 387,032 kg/h

## *Capítulo III*

### *Análisis del desempeño energético del central azucarero*

#### Balance de calor

En esta etapa se determina la potencia térmica requerida por el proceso ( $Q_{cald}$ ), los requerimientos de energía en equipos tecnológicos ( $Q_{NT}$ ), requerimientos de energía en los turbogeneradores ( $Q_{Pot}$ ), los requerimientos de energía en otros equipos ( $Q_{otros}$ ), la energía del condensado ( $Q_{cond}$ ) y las pérdidas de energía ( $Q_{perd}$ ). En la tabla 3.3 se reflejan los requerimientos de energía térmica en el proceso.

Tabla 3.3 Resultados del balance de calor

Equipos	Distribución del calor, kJ/h
$Q_{TG} = Q_{pot}$	36 312 274,700
$Q_{otros}$	4 994 891,567
$Q_{proceso}$ (vapor de escape)	119 230 349
$Q_{cond}$	27 957 666,520
$Q_{perd}$	48 136,311
$Q_{cald}$	361 785 900,700

La tabla 3.4 muestra la distribución de energía del proceso en la cual se observa un valor alto en las pérdidas de calor que representa el 47,8 %, muy por encima del 15% que es el valor normado, y están asociadas principalmente a la recuperación del condensado, aislamiento y fugas de vapor.

En este comportamiento influye, además de las causas comunes (fugas, condensados y aislamiento), el uso del vapor para el proceso de refinación, el cual no considera en este estudio.

Las pérdidas de energía están estrechamente vinculadas además con el consumo adicional de combustible, por tanto es posible mediante mejoras en el proceso reducir el consumo de vapor y por tanto de combustible. La tabla 3.5 muestra que existe un alto déficit de bagazo.

Tabla 3.4 Distribución de la energía en el proceso

Parámetros	Fórmula	Distribución de la energía, %	Valores reportados en la literatura (Espinosa, 2016a)
% Proceso	$\% \text{ proc} = \frac{Q_{proc}}{Q_{cal}} * 100$	32, 956 %	60-80 %

Análisis del desempeño energético del central azucarero

% Potencia	$\% pot = \frac{Q_{pot}}{Q_{cal}} * 100$	10, 037 %	2-5 %
% Condensados	$\% cond = \frac{Q_{cond}}{Q_{cal}} * 100$	7, 727 %	10-15%
% Otros	$\% otros = \frac{Q_{otros}}{Q_{cal}} * 100$	1, 381 %	2-4 %
% Pérdidas generales	$\% pérdidas = \frac{Q_{perd}}{Q_{cal}} * 100$	47, 898 %	<15 %

Tabla 3.5 Comportamiento del bagazo como combustible del proceso

Bagazo disponible (kg/h)	Bagazo quemado (kg/h)	Bagazo sobrante (kg/h)
28 279,638	52 432,739	-24 153,101

Los indicadores de desempeño energético correspondientes a los 105 días de zafra objeto de estudio se encuentran registrados en la tabla 3.6. El central azucarero actualmente reporta un único indicador de eficiencia relacionado con la energía (kWh generado /t caña). En la tabla se observa que este indicador es superior al reportado, condicionado por la incertidumbre en cuanto a los generadores que se encuentren en operación en un momento dado y su eficiencia.

El porcentaje de agua de reposición y la eficiencia térmica general son superiores a los valores normados.

Tabla 3.6 Indicadores de desempeño energético

Consumo específico de vapor, t vapor/t caña	1,520
Consumo específico de vapor, kg vapor/kg bagazo	2,243
Consumo de vapor de baja presión % caña	69,951
Consumo específico de vapor turbogeneradores kgv/kWh	11,042
Consumo específico de bagazo t bagazo/kWh	0,013
Generación específica de electricidad kWh/t caña	51,67
Consumo específico de vapor, t vapor/t azúcar	25,39
Consumo específico de bagazo, t bagazo/t azúcar	11,31
Consumo específico de energía térmica, MJ/t azúcar	78 107,8

*Capítulo III*  
*Análisis del desempeño energético del central azucarero*

Consumo específico de energía eléctrica, MWh/t azúcar	0,094
Flujo de vapor por válvula reductora, %	-47,83
Agua de reposición, %	31,77
Pérdidas de calor, %	47,89
Eficiencia térmica, %	52,10
Eficiencia de la generación, %	75,90

### 3.2 Propuesta tecnológica en el esquema energético

Las pérdidas generales tienen un valor muy superior al reportado por (Espinosa, 2019). Las mismas tienen relación con el combustible utilizado en el proceso. El bagazo resultante de la etapa de extracción del jugo es utilizado en la etapa de generación de vapor. Dicha materia no tiene un tratamiento previo por lo que posee un porcentaje de humedad relativa en el rango permisible, que se traduce en pérdidas.

Con el fin de minimizarlas, se propone que el bagazo húmedo proveniente de la molienda de la caña de azúcar se divida en dos partes; una parte va directamente al secador de bagazo para reducir al máximo el contenido de humedad y alcanzar las condiciones óptimas necesarias en la caldera, y el restante se almacena en la casa del bagazo hasta que se demande en los generadores de vapor. En la figura 3.1 se observa el diagrama de flujo para la propuesta tecnológica.

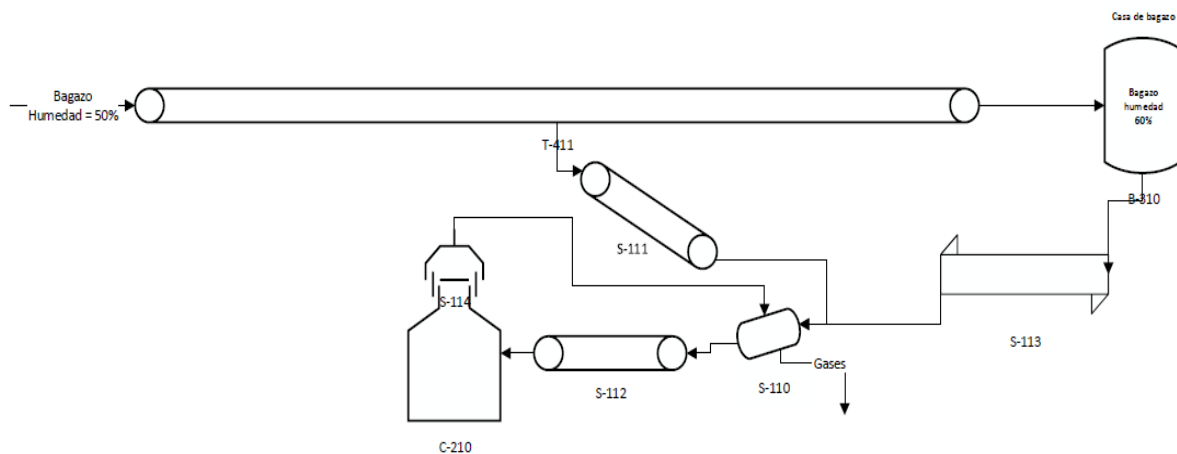


Figura 3.1. Diagrama de flujo de secado de bagazo

Leyenda:

S-110: Secador rotatorio de bagazo

S-111: Estera transportadora de bagazo hacia secador

S-112: Estera transportadora de bagazo hacia caldera

*Análisis del desempeño energético del central azucarero*

S-113: Reclamador para transportar bagazo desde casa de bagazo hacia secador

S-114: Extractor de gases de combustión

C-210: Caldera

B-310: Casa de bagazo

T-411: Estera transportadora de bagazo

**3.2.1 Balance de materiales en el esquema tecnológico propuesto**

La evaluación del diagrama tecnológico propuesto requiere el diseño del secador de bagazo para determinar los parámetros constructivos, y a su vez evaluar económicamente la factibilidad de la inversión.

Los datos utilizados para realizar el balance se muestran a continuación:

- ✓ Flujo de bagazo ( $F_g$ ): 52 000 kg/día
- ✓ Humedad del bagazo a la entrada del secador ( $H_{be}$ ): 50,58 %
- ✓ Humedad del bagazo a la salida del secador ( $H_{bs}$ ): 20 %
- ✓ Humedad de los gases de combustión a la entrada del secador ( $H_{gs}$ ): 15 %
- ✓ Humedad de los gases a la salida del secador ( $H_{ge}$ ): 60 %

El flujo de gases de combustión ( $F_c$ ) se calculó mediante la ecuación 3.1:

$$F_g * (H_e - H_s) = F_c * (H_s - H_e) \tag{3.1}$$

$$F_c = F_g * \left( \frac{(H_{be} - H_{bs})}{(H_{gs} - H_{ge})} \right) = 52000 * \left( \frac{(50,58 - 20)}{(60 - 15)} \right) = 35\,336,8 \text{ kg/día}$$

**3.2.2 Dimensionamiento del secador de bagazo**

El dimensionamiento del secador de bagazo partió de los datos registrados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros para realizar el dimensionamiento del secador de bagazo

Parámetro	Datos	UM	Conversión	UM
Humedad de gases entrada	15	%	0,176470588	kg agua/ kg gases
Humedad del bagazo entrada	50,58	%		
Humedad del bagazo salida	20	%		
Flujo del bagazo entrada	52000	kg/día		
Humedad de gases salida	60	%	1,5	kg agua/ kg gases

Análisis del desempeño energético del central azucarero

3.2.2.1 Procedimiento para diseñar el secador de bagazo

1. Determinar los kilogramos de agua presente en el bagazo.

$$X_1 = \frac{\% \text{ de humedad}}{100 - \% \text{ de humedad}} = \frac{60}{100 - 60} = 1,5 \text{ kgagua/kgss} \quad (3.2)$$

$$X_2 = \frac{\% \text{ de humedad}}{100 - \% \text{ de humedad}} = \frac{20}{100 - 20} = 0,25 \text{ kgagua/kgss} \quad (3.3)$$

2. Determinar Ls:

$$L_S = L * \left(1 - \frac{\% \text{ de humedad}}{100}\right) = 52\,000 * \left(1 - \frac{50,58}{100}\right) = 25\,698,4 \text{ kg/día} \quad (3.4)$$

3. Balance de humedad:

$$L_S * X_1 + G_S * Y_2 = L_S * X_2 + G_S * Y_1 \quad (3.5)$$

$$G_S = L_S * \left(\frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}\right) = 242 * \left(\frac{1,5 - 0,25}{1,5 - 0,176}\right) = 24\,262,08 \text{ kg/día} \quad (3.6)$$

4. El secador trabaja adiabáticamente por lo que el dimensionamiento adopta la forma:

- Diámetro

$$A = \frac{G}{G'} \quad (3.7)$$

$G' = 1,5 \text{ Kg/sm}^2$  (Se ha estimado como restricción de la velocidad másica respecto al gas con este valor por exceso de arrastre)

$$G = G_S * (1 + Y_M) \quad (3.8)$$

$$Y_M = \frac{0,176 + 1,5}{2} = 0,838 \text{ kg agua/ kg gases}$$

$$G = G_S * (1 + Y_M) = 24\,262,08 * (1 + 0,838) = 44\,593,71$$

$$A = \frac{0,5161}{1,5} = 0,344 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = 0,662 \text{ m} \quad (3.9)$$

Con los datos constructivos de secaderos rotatorios directos se escoge un diámetro de acuerdo con el calculado para corregir el área y la humedad.

Diámetro (m)	1,2	1,8	2,4	2,8	3,0
--------------	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: (Treybal, 1980)

*Análisis del desempeño energético del central azucarero*

Área corregida:  $A = 1,13 \text{ m}^2$        $G's = \frac{G}{A} = 0,248 \text{ Kg/sm}^2$

- Longitud

$$L = N_t * l_t \tag{3.10}$$

$$l_t = H_{toG} = \frac{G's * \bar{C}_S}{u_a} \tag{3.11}$$

$$u_a = \frac{273 * G's^{0,67}}{D} = 298,51 \text{ W/m}^3\text{K} \tag{3.12}$$

$$\bar{C}_S = 1\,005 + 1\,884 * Y_M = 2\,583,79 \text{ J/Kg}^\circ\text{C} \tag{3.13}$$

$$l_t = 2,15 \text{ m}$$

$$N_t = 1,5 \text{ (Para secadores rotatorios está entre 1,5 y 2)}$$

$$L = 2,15 \text{ m} * 1,5 = 3,22 \text{ m}$$

Los resultados obtenidos demuestran que para reducir la humedad de las 52 toneladas de bagazo necesarias en un día de un 50, 58 % hasta un 20 %, empleando los gases de combustión que poseen un por ciento de humedad en el rango de 15 % a 25 %, y minimizar las pérdidas relacionadas con su consumo se debe instalar un secador rotatorio de aproximadamente 1,2 m de diámetro y 3,22 m de longitud. En el Anexo 3 se muestran especificaciones generales del secador de bagazo.

**3.2.3 Evaluación económica de la propuesta tecnológica**

El efecto económico de la propuesta tecnológica sobre la instalación de un secador de bagazo se realiza considerando los ahorros potenciales de combustible y agua. En la determinación de las cantidades respectivas de dichos recursos, se asumen los siguientes valores:

1. Valor calórico neto del combustible (bagazo): 6 903 kJ/kg
2. Días de operación al año: 105, 24 días/año
3. Horas de trabajo diarias: 24 horas/día
4. Precios del bagazo: 143, 7 \$/t (aprox. 1,14 MLC/t)
5. Precio del agua: 4, 20 \$/m<sup>3</sup> (aprox. 0,03 MLC/m<sup>3</sup>)

Los gastos de bagazo y agua se definen para el esquema tecnológico actual, donde las pérdidas de calor son menores, por tanto según el balance energético:

$$\text{Consumo de bagazo} = \frac{Q_{\text{perd}}}{\text{VCN}} = \frac{48\,136}{6\,903} = 6,97 \text{ kg/s} = 63\,260 \text{ t/año}$$

*Análisis del desempeño energético del central azucarero*

Para la determinación de los gastos adicionales de agua de reposición, se asume que se consumen 16,7 % por encima del 15 %, que es el valor normal. Esto determina que se consuman 6,24 m<sup>3</sup>/h (15 724 m<sup>3</sup>/año).

En la tabla 3.8 se exponen los resultados correspondientes al ahorro de recursos materiales y financieros.

Tabla 3.8 Ahorro de recursos materiales y financieros.

Recurso	Ahorro anual de recursos (t/año)	Ahorro de recursos financieros (\$/año)
Agua (m <sup>3</sup> )	15 724	471,7
Bagazo (t)	63 260	72 116,4
Total	78 984	72 588

**3.2.4 Estimación de la factibilidad del proyecto de inversión**

Los gastos adicionales de combustible y agua constituyen ahorros potenciales para estimar la factibilidad de un proyecto de inversión en el área de la energía.

Para estimar la factibilidad del proyecto de inversión se consideran ingresos las pérdidas actuales referidas en la Tabla 3.3, que se traducen en ahorro de recursos financieros una vez que se ejecute la inversión. Se asume un período de operación de 105 días/año y el MLC como única moneda en todos los análisis.

Los valores asumidos de vida útil y tasa de interés son de 15 años y 12 % respectivamente y un método de depreciación lineal. En el análisis de rentabilidad se utiliza un recurso informático en un libro Excel denominado Cost & Evaluation Workbook que acompaña a la 5<sup>ta</sup> edición del libro Plant Design and Economics for Chemical Engineers y la metodología utilizada por (Peters, 1991).

El costo de adquisición del secador rotatorio es de 50 000, 00 MLC (Made-in-China, 2022) que representa un costo de inversión de \$ 172 700,00 para la estimación del tiempo de recuperación de la inversión.

Utilizando las herramientas descritas, y tomando los resultados de la estimación de costos del secador rotatorio y los ahorros por eliminación de las pérdidas de recursos financieros, se determinan los indicadores de rentabilidad (VAN y PRD). Los valores obtenidos son mostrados en la tabla 3.9, y el flujo de caja en la Figura 3.2.

Tabla 3.9 Indicadores de rentabilidad

## *Capítulo III*

### *Análisis del desempeño energético del central azucarero*

Indicadores de rentabilidad	
Valor actual neto (VAN), CUP	280 011,49
TIR,%	38
Período de recuperación al descontado (PRD), años	5

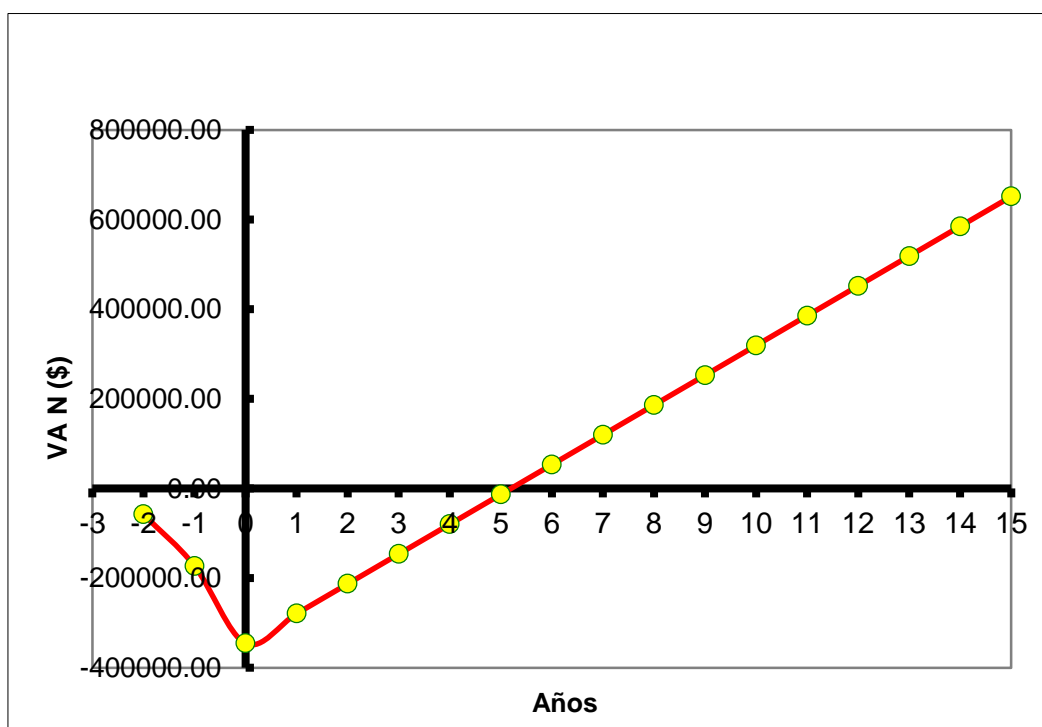


Figura 3.2 Flujo de caja

#### **Conclusiones parciales**

1. Las pérdidas de calor representan el 47,8 %, muy por encima del valor normado, y por tanto provocan un consumo adicional de combustible, que determinan un consumo de bagazo adicional de 63 260 t/a muy cercano a un déficit de bagazo de 52 433 t/a.
2. El análisis del uso de la energía hizo posible obtener 14 indicadores de desempeño energético, no reportados hasta ahora en este central azucarero, a partir de los cuales se puede definir una línea base energética para la evaluación sistemática de la eficiencia del uso de la energía.
3. El diseño de un secador rotatorio para el secado del bagazo permitió seleccionar un equipo con el cual se alcanza una humedad final de hasta 12 % con diámetro y longitud de 1,2 y 3,22 m, respectivamente.

*Análisis del desempeño energético del central azucarero*

4. El ingreso estimado por concepto de ahorro de agua de reposición y calor perdido, hace factible proponer un proyecto, cuya inversión se recupera en aproximadamente 5 años y un VAN de \$ 280 011,49.

### **Conclusiones**

1. El procedimiento adoptado para el análisis del uso y el consumo de la energía en la industria enriquece las actividades normadas para los sistemas de gestión de la energía.
2. Las pérdidas de calor representan el 47,8 %, muy por encima del valor normado, y por tanto provocan un consumo adicional de combustible, que determinan un consumo de bagazo adicional de 63 260 t/a muy cercano a un déficit de bagazo de 52 433 t/a.
3. El análisis del uso de la energía hizo posible obtener 14 indicadores de desempeño energético, no reportados hasta ahora en este central azucarero, a partir de los cuales se puede definir una línea base energética para la evaluación sistemática de la eficiencia del uso de la energía.
4. El diseño de un secador rotatorio para el secado del bagazo permitió seleccionar un equipo con el cual se alcanza una humedad final de hasta 12 % con diámetro y longitud de 1,2 y 3,22 m, respectivamente.
5. El ingreso estimado por concepto de ahorro de agua de reposición y calor perdido, hace factible proponer un proyecto de inversión, con un VAN de \$ 280 011,49, cuyo presupuesto se recupera en 5 años.

### **Recomendaciones**

1. Consultar el presente documento para la continuidad de las investigaciones relacionadas con el análisis de la energía en el proceso de crudo y refino.
2. Establecer el uso sistemático de los indicadores de desempeño energético determinados en el presente trabajo para establecer una línea base energética.

### Referencias bibliografía

- 50001, I. 2019. Energy management systems — Requirements with guidance for use (in Spanish).
- 50001, N.-I. 2011. Sistemas de gestión de la energía-Requisitos con orientación para su uso. La Habana: Oficina Nacional de Normalización (NC).
- ABREU, H. 2016. Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar. *Centro Azúcar*. Santa Clara.
- BORROTO, A. 1998. *Evaluación Económica de Proyectos de Ahorro de Energía*. Universidad de Cienfuegos.
- BORROTO, A. 2000. *RE: Gestión Energética en la Agroindustria de la Caña de Azúcar*.
- BORROTO, A. E. 2002. *Gestión Energética Empresarial*, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos.
- BORROTO, A. E. 2006. *Gestión energética en el sector productivo y los servicios*, Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.
- BRICEÑOS, C. 1997. "Auditorías energéticas en ingenios colombianos". *Internacional Sugar Journal*.
- CAPOTE, O. 2001. Optimización de los esquemas energéticos en centrales azucareros. *Revista Cuba Azúcar*.
- CEPCI, 2021. Economic Indicators
- CHEN, J. 1999. *Manual del azúcar de caña para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*, México, Editorial LIMUSA.
- CITMA, 1998. Elementos metodológicos para la introducción de prácticas de producciones más limpias. Alternativas para el aprovechamiento económico de residuales. La Habana.
- CNEE, 2010. *Diagnósticos energéticos.FIDE* [Online]. Available: [www.cnee.gob.gt](http://www.cnee.gob.gt).
- COAKLED, T. 2010. *Uso de la energía en el sector industrial* [Online]. Available: [www.iuses.eu/materiali/e/MANUALES\\_PARA.../Manual\\_industria.pdf](http://www.iuses.eu/materiali/e/MANUALES_PARA.../Manual_industria.pdf).
- CONAE 2011. *Diseño de sistemas de cogeneración*, México, Amacalli Editores. SA.
- CUBA, C. D. M. D. 2014. *Reglamento del proceso inversionista*. [Online]. Available: <http://www.camaracuba.cu/index.php/es/descargas/category/1->.
- EGRANCONEL. 2006. *Optimizar la eficiencia energética en la industria del ecuador* [Online]. Available: [www.Egranconel.com](http://www.Egranconel.com)
- ENERGIZA. 2016. *Diagnostico energético* [Online]. Available: <http://www.energiza.biz/wpcontent/uploads/2016/06/3Diagnosticoenergetico.pdf>.
- ESPINOSA, R. 1990. Sistemas de Utilización del Calor en la Industria Azucarera. .

- ESPINOSA, R. 2014. *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*, Samuel Feijóo.
- ESPINOSA, R. 2016. Algunos índices usados en la producción del azúcar de caña. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- ESPINOSA, R., HERNÁNDEZ, J. P., ESPINOSA, J., CASTELLANOS, J. 2019. *Gestión Energética Eficiente y Análisis de los Sistemas Auxiliares en las Plantas Químicas*.
- EXTRANJERA, C. D. O. D. I. 2015.
- FAQS. 2017. *Frequently Asked Questions (FAQs) on Biomass* [Online]. Available: <http://www.mnre.gov.in>.
- FERNÁNDEZ, K. 2013. *Evaluación técnico-económica de alternativas de adaptación tecnológicas para biorrefinerías en una industria de la caña de azúcar*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- FRAILE, D. 2008. *RE: Cogeneración: Aspectos tecnológicos*.
- GONZÁLEZ, M. 2015. *La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes*, New York.
- GONZÁLEZ, M., ABREU, H., RICO, O., ZAMORA, M., ESPINOSA, R. 2016. Análisis energético y exergético de esquemas de cogeneración para la industria azucarera. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. Ciudad de La Habana: Instituto Cubano de los Derivados de la Caña de Azúcar.
- HERNÁNDEZ, J. P., ESPINOSA, R., PÉREZ, C., GARCÍA, A.M., GARCÍA, A. 2020. *Gestión energética en un central de azúcar crudo con uso del software STA 4.1*. Centro Azúcar. p: 77-89.
- HERNÁNDEZ, J. P. D. A. M., A.; ESPINOSA, R.O.; PÉREZ, O.; GUERRA, L. 2021. *Procedimiento de análisis energético para la conversión de industrias de la caña de azúcar en biorrefinerías*. pp. 277-288.
- HERNÁNDEZ, M. L. 2010. *Los diagnósticos energéticos* [Online]. Available: [www.fonanperu.org](http://www.fonanperu.org)
- HERNÁNDEZ, O. 2017. *Análisis energético en la Empresa Azucarera Quintín Bandera*.
- HUGOT, E. 1986. *Handbook of cane sugar engineering*, New York, Elsevier Science.
- ICIDCA 1986. *La industria de los derivados de la caña de azúcar*, La Habana, Editorial científico técnico.
- ICINAZ 2005. *Reporte sobre el Uso Eficiente del agua en la operación industrial*. Resumen ejecutivo.
- IPROYAZ 2015. *Informe Esquema de Evaporación UEB CA Quintín Bandera*. pp. 4-10.

- KEENAN, J., KEYES, F., HILL, P. 1990. Thermodynamics Properties of water including Vapor, Liquid and Solid Phases. pp. 2-14. .
- MADE-IN-CHINA. 2022. *Rotary Sugarcane Bagasse Dryer Machine with Favourable Price* [Online]. Available: <https://es.made-in-china.com/>.
- MATEO, N. 1996. *Cogeneración. Selección de alternativas y estudio de viabilidad*.
- MCKEEN, L. 2003. *Alternativas para la integración energética de la fábrica de papel de Damují*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- MINAZ 1998. Estudio del consumo de agua. pp. 2- 6.
- MINERÍA, M. D. E. Y. 2022. *Folleto de diagnósticos energéticos* [Online]. Available: [https://www.minem.gob.ar/archivos/Reorganizacion/eficiencia/folleto\\_diagnosticos\\_energeticos\\_vf.pdf](https://www.minem.gob.ar/archivos/Reorganizacion/eficiencia/folleto_diagnosticos_energeticos_vf.pdf).
- MORALES, J. 2011. *Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación*. Universidad Veracruzana.
- MOTITO-LEGRÁ, J. A. 2014. *Estudio de las aguas industriales y residuales en la UEB Central Azucarero "Paquito Rosales"*
- NORDELO, A. B. 2013. *Recomendaciones metodológicas para la implementación de sistemas de gestión energética según la norma ISO 50001*.
- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2019. ISO 50001. Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso.
- PÉREZ DE ALEJO, H. Como hacer un uso eficiente de la energía en un central azucarero. Conferencia Mundial sobre la Biomasa para la Energía, el Desarrollo y el Medio Ambiente.
- PETERS, M. S., TIMMERHAURS, K. D. 1991. Plant Design and Economics for Chemical Engineers.
- PIERO, J. 2021. APPLICATION OF COGENERATION AND TRIGENERATION SYSTEMS. R E V I S T A B O L E T Í N R E D I P E. Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander.
- REIN, P. 2012. *Ingeniería de la caña de azúcar*.
- RODRÍGUEZ, P. 1997. *Manual de cálculo rápido para la industria azucarera*, Ministerio de Economía y Planificación.
- SÁNCHEZ, J. 2018. LA INDUSTRIA AZUCARERA IMPORTANTE FUENTE PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN CUBA. *Revista: Caribeña de Ciencias Sociales*. La Habana.
- SAFETYCULTURE. 2022. *Herramientas de gestión de la calidad* [Online]. Available: <https://safetyculture.com/es/temas/herramientas-de-gestion-de-calidad/>
- VALDÉS, A. 1996. Cogeneración de energía eléctrica en la industria azucarera cubana.

## *Bibliografía*

VALDÉS, A. 2009. Biomasa de la caña de azúcar para transporte

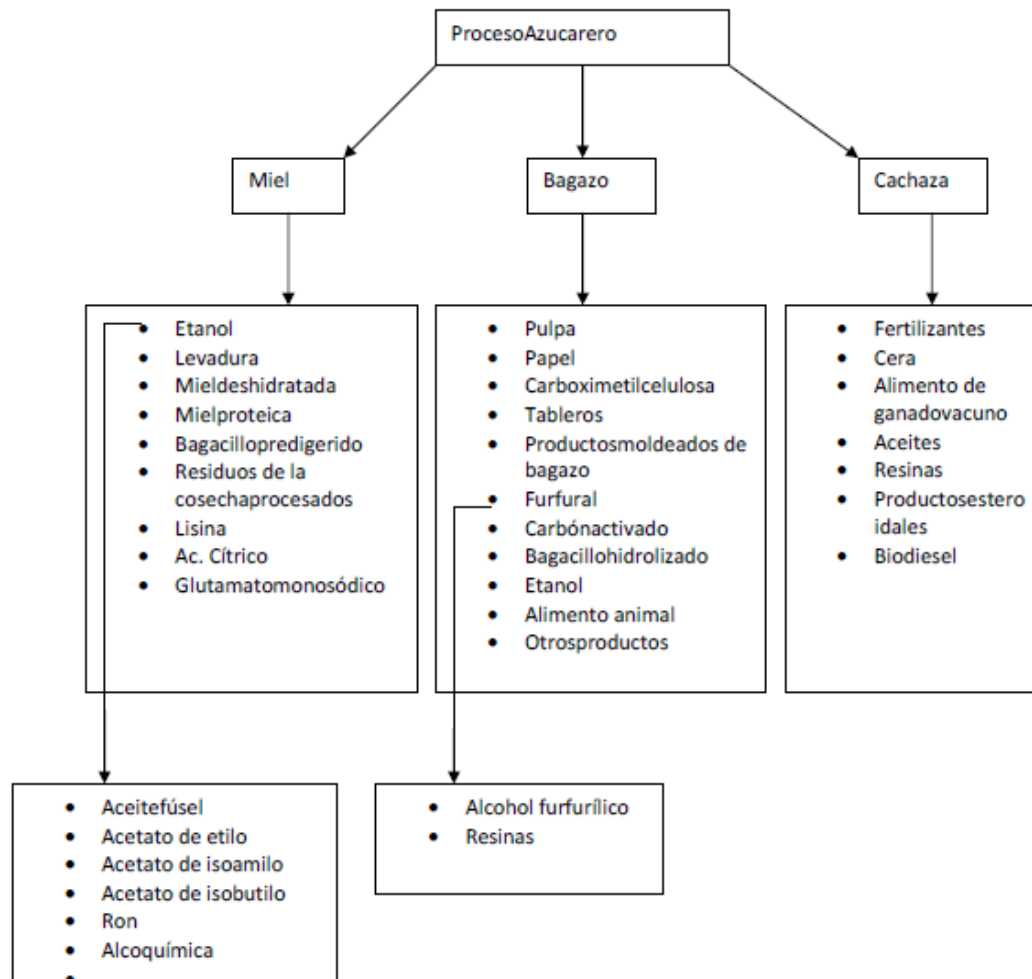
VILLEGAS, A. 2005. *Desarrollo del Archivo Tecnológico de la Planta Piloto “José Martí”*.

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

ZANZ, D. 2014. *Análisis y optimización exergética de una planta de cogeneración para la industria azucarera*. Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira.

Anexos

Anexo 1. Subproductos fundamentales de la industria azucarera y sus producciones derivadas



**Anexo 2. Datos utilizados en el balance de energía**

Equipos	Parámetros	Nomenclatura	Valor	UM
Turbogenerador 1 y 3	Eficiencia producida.	$N_1$	4000	kW-h
Turbogenerador 2	Eficiencia producida.	$N_2$	2 000	kW-h
Turbogeneradores 1 , 2 y 3	Eficiencia termodinámica.	$n_t$	0,70	-
	Eficiencia mecánica.	$n_m$	0,90	-
	Eficiencia eléctrica.	$\eta_{el\acute{e}ct}$	0,90	-
	Eficiencia de la tubería	$\eta_{tub}$	0,90	-
	Presión del vapor alimentado.	$P_v \text{ alim.}$	1,8	MPa
	Temperatura del vapor alimentado.	$T_v \text{ alim.}$	320	°C
	Calor latente del vapor alimentado.	$\lambda_{ve}$	3075,14	kJ/kg
	Presión del vapor de salida.	$P_v \text{ sal.}$	0,202	MPa
	Temperatura del vapor de salida.	$T_v \text{ sal.}$	120	°C
	Calor latente del vapor de salida.	$\lambda_{vs}$	2745	kJ/kg
	Calor latente del vapor en el ciclo adiabático ideal.	$\lambda(CAI)$	2600	kJ/kg
Calentador primario 1	Temperatura de entrada del jugo mezclado.	$t_e$	45	°C
	Temperatura de salida del jugo mezclado.	$t_s$	68	°C
Calentador primario 2	Temperatura de entrada del jugo mezclado.	$t_e$	68	°C
	Temperatura de salida del jugo mezclado.	$t_s$	97	°C
Calentadores primarios 1 y 2	Presión del vapor alimentado.	$P_v \text{ alim.}$	0,11	MPa
	Brix del jugo mezclado.	$Bx_{j.mezc.}$	14,22	°Bx
	Calor latente del vapor.	$\lambda_v$	2250,4	kJ/kg
Calentador rectificador 1	Temperatura de entrada del jugo mezclado.	$t_e$	97	°C
	Temperatura de salida del jugo mezclado.	$t_s$	106	°C
Calentador rectificador 2	Temperatura de entrada del jugo mezclado.	$t_e$	106	°C
	Temperatura de salida del jugo mezclado.	$t_s$	110,04	°C
Calentadores rectificadores 1 y 2	Presión del vapor alimentado.	$P_v \text{ alim.}$	0,16	MPa
	Brix del jugo mezclado.	$Bx_{j.mezc.}$	14,22	°Bx
	Calor latente del vapor.	$\lambda_v$	2220,71	kJ/kg
Calentador de jugo clarificado	Temperatura de entrada del jugo mezclado.	$t_e$	107,6	°C
	Temperatura de salida del jugo mezclado.	$t_s$	118,1	°C

## Anexos

	Presión del vapor alimentado.	Pv alim.	0,16	MPa
	Brix del jugo clarificado.	BX <sub>j,mezc.</sub>	14,22	°Bx
	Calor latente del vapor.	λ <sub>v</sub>	2220,71	kJ/kg
Pre-evaporador	Presión del vapor alimentado.	Pv alim.	0,211	MPa
	Presión del cuerpo.	Pc	0,16	MPa
	Temperatura del jugo claro a la entrada	t <sub>jc</sub>	107,6	°C
	Temperatura del jugo claro a la salida	t <sub>jc</sub>	118,1	°C
	Concentración del jugo de entrada.	BX <sub>e</sub>	14,6	°Bx
	Concentración del jugo de salida	BX <sub>s</sub>	30,73	°Bx
	Calor latente del vapor en el cuerpo.	hcu	2222,23	kJ/kg
	Calor latente del vapor en la calandria.	hvc	2199,38	kJ/kg
Efecto 2	Presión del vapor alimentado.	Pv alim.	0,16	MPa
	Presión del cuerpo.	Pc	0,11	MPa
	Brix de entrada al segundo vaso	BX <sub>e</sub>	30,73	°Bx
	Brix de salida de la meladura.	BX <sub>s</sub>	43,74	°Bx
	Calor latente del vapor en el cuerpo.	hcu	2251,19	kJ/kg
	Calor latente del vapor en la calandria	hvc	2222,23	kJ/kg
	Temperatura de ebullición del 2do efecto.	t <sub>eb.</sub>	102,02	°C
	Temperatura de alimentación jugo	tf	113,73	°C
Efecto 3	Presión del vapor alimentado.	Pv alim.	0,11	MPa
	Presión del cuerpo.	Pc	0,062	MPa
	Brix de entrada al tercer vaso	BX <sub>e</sub>	43,74	°Bx
	Brix de salida de la meladura.	BX <sub>s</sub>	51,3	°Bx
	Calor latente del vapor en el cuerpo.	hcu	2292,15	kJ/kg
	Calor latente del vapor en la calandria	hvc	2251,19	kJ/kg
	Temperatura de ebullición del 2do efecto.	t <sub>eb.</sub>	86,29	°C
	Temperatura de alimentación jugo	tf	103,2	°C
Efecto4	Presión del cuerpo.	Pc	0,013	MPa
	Brix de entrada al cuarto vaso	BX <sub>e</sub>	51,3	°Bx
	Brix de salida de la meladura.	BX <sub>s</sub>	65	°Bx
	Calor latente del vapor en el cuerpo.	hcu	2380,43	kJ/kg
	Calor latente del vapor alimentado.	hvc	2292,09	kJ/kg

## Anexos

	Temperatura de ebullición del 2do efecto.	$t_{eb.}$	50,66	°C
	Temperatura de alimentación jugo	$t_a$	86,29	°C
Tacho 1	Peso específico.	$\gamma$	1450	kg/m <sup>3</sup>
	Volumen del pie de templa.	$V_i$	12,5	m <sup>3</sup>
	Volumen final.	$V_f$	25	m <sup>3</sup>
	Concentración del pie de templa.	$B_{X_1}$	91,39	°Bx
	Concentración del material alimentado.	$B_{X_2}$	61,03	°Bx
	Tiempo de cocción.	$t$	1,4	h
	Concentración final.	$B_{X_3}$	92,52	°Bx
	Tacho 2	Volumen del pie de templa.	$V_i$	13,5
Volumen final.		$V_f$	25	m <sup>3</sup>
Concentración del pie de templa.		$B_{X_1}$	92,05	°Bx
Concentración del material alimentado.		$B_{X_2}$	61,07	°Bx
Tiempo de cocción.		$t$	1,35	h
Concentración final.		$B_{X_3}$	92,52	°Bx
Tacho 3	Volumen del pie de templa.	$V_i$	15	m <sup>3</sup>
	Volumen final.	$V_f$	28	m <sup>3</sup>
	Concentración del pie de templa.	$B_{X_1}$	92,45	°Bx
	Concentración del material alimentado.	$B_{X_2}$	63,5	°Bx
	Tiempo de cocción.	$t$	1,5	h
	Concentración final.	$B_{X_3}$	93,2	°Bx
Tacho 4	Volumen del pie de templa.	$V_i$	16,5	m <sup>3</sup>
	Volumen final.	$V_f$	36	m <sup>3</sup>
	Concentración del pie de templa.	$B_{X_1}$	92,3	°Bx
	Concentración del material alimentado.	$B_{X_2}$	60	°Bx
	Tiempo de cocción.	$t$	1,4	h
	Concentración final.	$B_{X_3}$	92,5	°Bx
Tacho 5	Volumen del pie de templa.	$V_i$	17,5	m <sup>3</sup>
	Volumen final.	$V_f$	38,14	m <sup>3</sup>
	Concentración del pie de templa.	$B_{X_1}$	91,4	°Bx

## *Anexos*

	Concentración del material alimentado.	Bx <sub>2</sub>	64,2	°Bx
	Tiempo de cocción.	t	2,2	h
	Concentración final.	Bx <sub>3</sub>	91,8	°Bx
Caldera	Temperatura del vapor producido.	T <sub>v</sub>	320	°C
	Temperatura de los gases de la chimenea.	T <sub>g</sub>	180	°C
	Temperatura del agua de alim.	T <sub>a alim.</sub>	115	°C
	Humedad del bagazo.	w	50	%
	Calor latente del vapor sobrecalentado.	λ <sub>vs</sub>	720,79	kcal/kg
	Relación de aire empleado.	m	1,5	-
	Coficiente de pérdidas.	α	0,99	-
	Coficiente de pérdidas.	β	0,92	-
	Coficiente de pérdidas.	γ	0,9	-
	Coficiente de pérdidas.	x	1,05	-

**Anexo 3. Especificaciones del secador de bagazo**

Model NO.	JTSG
Application	Biomass Fuel, Animal Feeds
Weight	22t-76t
Output Capacity	1.08-8.57 T/H
Early Moisture	35%-45%
Temperature	250-310
Specification	22t-76t
HS Code	8419399090

Operational Method	Continuous
Power	34-155kw
Input Capacity	1.53-12.14 T/H
Vaporization	0.45-3.57 T/H
Final Moisture	15% (Adjustable)
Transport Package	Container
Origin	Henan, China
Production Capacity	20 Sets/Month

