



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Centro de Estudio de Energía y Tecnologías Ambientales

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial

Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas"

Título: Evaluación y propuestas de mejoras del
esquema termo energético de la Unidad Empresarial de
Base "Carlos Baliño"

Autor: Luis Alberto Arocha Morfa

Tutor: Dr.C. Idalberto Herrera Moya

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la universidad.

Firma del Autor

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

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento

"La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones. "

Albert Einstein

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma en especial a mis padres, familia y a quien va a mi lado, por su paciencia y apoyo constante durante la realización del mismo.

"A todos ustedes les dedico este proyecto"

Agradecimientos

Quiero agradecer en especial a mi tutor Idalberto Herrera Moya por su acertada guía y ayuda durante toda la elaboración de este trabajo.

A Janoy Suarez Núñez quien me brindó su ayuda incondicional en todas mis investigaciones de campo en la UEB "Carlos Baliño".

A todos los profesores que de una forma u otra me brindaron su ayuda profesional.

A mis compañeros y amigos que me apoyaron en todo momento.

"A todos muchas gracias"

Resumen

Teniendo en cuenta la tendencia mundial de generar electricidad con fuentes de energía renovables, el presente trabajo estuvo dirigido a evaluar y proponer mejoras del esquema termo energético de la "UEB Carlos Baliño". En un primer momento se realizó un estudio del contexto en que se desempeña la industria azucarera en el mundo y las perspectivas de la misma en Cuba. Luego se exponen las tecnologías de la fábrica para la generación de vapor y electricidad, la cual consta con una caldera de capacidad de generación de vapor de 60 t/h y un sistema de generación de electricidad con 2 turbinas de contrapresión y 2 generadores con una potencia instalada de 1.5 MW. Se determinó que la industria alcanza un índice de generación de electricidad y vapor con valores entre 30-35 kWh/tc y 470-500 kg/tc respectivamente, los cuales la sitúan por debajo de los estándares promedio de las industrias en el mundo por lo que se hace una propuesta de mejora. Se analizó brevemente las ventajas ambientales que representa el uso del bagazo como fuente de energía renovable, así como las ventajas económicas en la generación de energía eléctrica con las mejoras propuestas. Las cuales son reflejadas en 1000 kW de potencia instalada adicionales que incrementan a la venta de energía eléctrica al SEN, lo que representan alrededor de 0.5 MMUSD al año, para un período de recuperación de la inversión de 2.35 años, con un ingreso total en el período de duración del proyecto cercano a los 7 MMUSD.

Abstract

Given the global trend of generating electricity with renewable energy sources, the present work was aimed to evaluate and propose improvements in thermal energy scheme in "UEB Carlos Baliño". Initially a study of the context in which the sugar industry in the world is working and the prospects of it in Cuba. Then technologies for steam and electricity generation in the sugar mill are exposed, which has a boiler generating capacity steam 60 t/h and a system generating electricity with 2 turbines counter and 2 generators with an installed capacity of 1.5 MW. It was determined that the industry reaches a rate of generation of electricity and steam with values between 30-35 kWh/tc and 470-500 kg/tc respectively, which are below the average industry standards in the world so a proposal for improvement is made. The environmental benefits are briefly analyzed that represents the use of bagasse as a source of renewable energy, as well as economic advantages in the generation of electricity with the proposed improvements. Which they are reflected in 1000 kW of energy that increase sales to SEN, which represent about 0.5 MMUSD a year, for a recovery of investment in 2.35 years and a total income during the project close to 7.00 MMUSD.

Índice

RESUMEN.....	I
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO1	4
1.1. -CONTEXTO EN EL QUE SE DESEMPEÑA LA INDUSTRIA AZUCARERA A NIVEL MUNDIAL Y EN CUBA.	5
1.2. -INFLUENCIA DE LA INDUSTRIA AZUCARERA EN EL PANORAMA ENERGÉTICO A NIVEL INTERNACIONAL Y EN CUBA.	5
1.3. -ESQUEMAS ENERGÉTICOS MÁS USADOS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA Y EN VALOR DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJO DE LOS MISMOS.	7
1.4.-VARIABLES DE MAYOR INFLUENCIA EN LOS ESQUEMAS ENERGÉTICOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA.....	10
1.5.-CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.	13
CAPÍTULO 2	14
2.1-CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE VAPOR.....	15
2.1.1.- <i>Descripción del Generador de vapor.</i>	15
2.1.2.- <i>Cálculos constructivos.</i>	17
2.1.3.- <i>Cálculos térmicos</i>	18
2.1.4.- <i>Cálculos aerodinámicos</i>	20
2.2.-CARACTERIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	22
2.2.1.- <i>Descripción de las turbinas.</i>	23
2.3.- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PRINCIPALES ÍNDICES EN LA INDUSTRIA.	24
2.3.1- <i>Análisis de la zafra 2014-2015.</i>	24
2.3.1.1- Cálculo de los índices de eficiencia.....	25
2.3.2- <i>Análisis de la zafra 2015-2016.</i>	27
2.3.2.1- Cálculo de los índices de eficiencia.....	27
2.4.-ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE GENERACIÓN CON RESPECTO A OTRAS INDUSTRIAS AZUCARERAS.	29
2.5.- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.	30
CAPÍTULO 3	32
3.1.- IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALIDADES PARA ELEVAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.	33
3.1.1- <i>Propuesta de un nuevo esquema de generación con la implementación de un ciclo regenerativo.</i>	34
3.1.1.1-Pérdidas de calor en la tubería de vapor sin aislamiento térmico.....	35
3.1.2- <i>Análisis del esquema de generación propuesto.</i>	36
3.1.2.1-Análisis en las turbinas.....	37
3.1.2.2-Balance de energía en el tanque de condensado.....	39
3.1.2.3-Balance de energía en la cámara de mezclado.....	40
3.1.2.4-Balance en la bomba de alimentación a la caldera.....	41
3.2.-EVALUACIÓN DE LAS IMPLICACIONES AMBIENTALES Y ECONÓMICAS.	42
3.2.1.- <i>Implicaciones ambientales.</i>	42
3.2.2.- <i>Implicaciones económicas.</i>	45
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

Introducción

La tendencia de hoy en día a nivel internacional y en el país es la de llevar la industria azucarera a altos niveles de producción y eficiencia, con el objetivo de generar una mayor cantidad de energía eléctrica. En este proceso el vapor generado a base de bagazo y residuos agrícolas cañeros es un portado energético clave. En esta dirección, se hace imperativo elevar los parámetros de trabajo de los ciclos de generación de potencia en este sector, como la presión y la temperatura de trabajo de las calderas y los turbogeneradores, e implementar todas las mejoras conceptualmente posibles.

Actualmente, la industria azucarera aporta el 3,5 por ciento de la generación de electricidad del sistema electro energético nacional (SEN) de Cuba. El plan para elevar la eficiencia energética en el país contempla que para 2030 una veintena de ingenios generen un excedente de 755 MW para alimentar la red del SEN. Actualmente, las energías renovables solo representan 4,6 por ciento de la generación y el resto lo aportan los combustibles fósiles. La paulatina instalación en los ingenios de modernas plantas bioeléctricas, necesarias para lograr ese objetivo, requiere una inversión estimada en 1.290 millones de dólares, que AZCUBA espera obtener de préstamos gubernamentales o inversiones extranjeras.(Gutiérrez, 2013)

“Donde no aparece un crédito, aparece la inversión extranjera”, dijo Jorge Lodos, director de negocios de Zerus SA, subsidiaria de AZCUBA. El ejecutivo precisó a Tierramérica que las dos primeras empresas en asociarse con Cuba en el sector incluyeron en sus planes las plantas bioeléctricas para elevar la eficiencia energética.(Gutiérrez, 2013)

La primera de las plantas alimentadas con biomasa cañera comenzará su producción en 2016. Se prevé la construcción en áreas aledañas al central Ciro Redondo, en la provincia de Ciego de Ávila, a 423 kilómetros de La Habana, por Biopower, la

empresa mixta conformada en 2012 por Zerus y la firma británica Havana Energy Ltd.(Gutiérrez, 2013)

Este trabajo tiene como propósito evaluar y realizar una propuesta de mejoras del esquema termo energético de la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Carlos Baliño”. Esta fábrica de azúcar fue fundada en el año 1903 por los hermanos de nacionalidad española Juan y Ramón Ulacia, llevando por nombre el apellido de sus fundadores (Ulacia) hasta su nacionalización en 1960. Es a partir de esta fecha recibe en nombre de “Carlos Baliño”.

En 1940 el central fue adquirido por un gran colono de la zona oriental llamado Francisco Blanco Calá, de nacionalidad cubana quien permaneció al frente del mismo hasta el año 1960, en que fue intervenido por el gobierno revolucionario. En sus primeros años el central utilizó una máquina de balancín, con el paso del tiempo fueron cambiando su maquinaria por otras más avanzadas, buscando mayor eficiencia y calidad en la fabricación del azúcar.

Este ingenio produjo desde 1983 hasta 1988 azúcar blanco directo de calidad y se hicieron dos zafras: 1989 y 1990 de azúcar refino B, también con resultados satisfactorios en cuanto a la calidad.

En la actualidad la UEB es productora de azúcar orgánica desde el año 2000, este producto se elabora sin la utilización de químicos por lo que resulta muy beneficioso para la salud humana. Es comercializada en países del primer mundo, fundamentalmente en los del continente europeo.

Para el cumplimiento de este trabajo se plantea a continuación el problema a resolver y los objetivos.

Problema a resolver

Baja eficiencia energética de la Unidad Empresarial de Base "Carlos Baliño", lo que conlleva a un bajo aprovechamiento en esta entidad del potencial de aporte de energía eléctrica a partir de biomasa cañera al SEN.

Objetivo general

Evaluar el sistema termo energético de la Unidad Empresarial de Base (UEB) "Carlos Baliño" y proponer proyectos de mejoras viables para maximizar la entrega de energía eléctrica al sistema electro energético nacional (SEN) mediante la mejora de los parámetros termodinámicos y la eficiencia del ciclo de transformaciones energéticas.

Objetivos específicos

1. Estudiar del estado del arte de la tecnología para los sistemas termo energético de las fábricas de azúcar.
2. Evaluar el sistema termo energético actual de la UEB "Carlos Baliño", con atención a los índices de generación de vapor, eficiencia de la generación de vapor, índice de generación de energía eléctrica, generación bruta, generación/entrega neta, índice de consumo de energía eléctrica
3. Identificar posibles mejoras del ciclo de transformaciones energéticas actual y evaluar sus impactos económicos y ambientales.

Hipótesis

Es posible realizar mejoras al esquema termo energético de la Unidad Empresarial de Base "Carlos Baliño" que permita obtener una mayor generación de energía.

Capítulo1

Marco Teórico

1.1. -Contexto en el que se desempeña la industria azucarera a nivel mundial y en Cuba.

La industria azucarera en algunos países del mundo representa una de las industrias con más posibilidades de desarrollo pues estas plantas además de producir azúcar, renglón importante de algunas economías en evolución, generan energía eléctrica. Por este motivo se busca una mayor eficiencia desde la generación de vapor hasta el uso eficiente del mismo tanto en los procesos de fabricación como en la generación de electricidad. Además de un uso eficiente de la energía eléctrica dentro de la industria, con el objetivo de hacer cada vez mayor la entrega a la red comercial. Bajo este punto de vista se trabaja a nivel internacional puesto que esta energía además de ser menos costosa de producir por la razón de que para generar el vapor se utiliza el bagazo proveniente de la caña que se muele; se evita el alto consumo de combustible fósil. Esto implica el uso de una fuente renovable de energía y una reducción en las emisiones de los gases de efecto invernadero perjudiciales para el medio ambiente que resultan de la quema de los combustibles fósiles.

En Cuba se sigue esta política de desarrollo sostenible y se han comenzado una serie de proyectos en la industria azucarera buscando modificaciones que permitan un aumento en la energía generada por toneladas de caña molida. Para esto se valoran aspectos como la variación de los parámetros de explotación (presión y temperatura) de las plantas generadoras.

1.2. -Influencia de la industria azucarera en el panorama energético a nivel internacional y en Cuba.

Las bioeléctricas suscitan hoy creciente interés en el mundo y en Cuba ante la necesidad de producción de energía compatible con el medio ambiente. Actualmente una decena de naciones son paradigmas en el uso de esas instalaciones: Isla Reunión, India, Isla Mauricio, Australia, Isla Guadalupe, Belice, Guatemala, Estados Unidos, Costa Rica, China y particularmente Brasil, que posee 160 de 188 existentes

en el orbe. Globalmente estas unidades tienen un potencia instalada de más 2.800 megavatios, y de esa cifra al menos dos mil corresponden a Brasil, secundado en cuanto a cantidad de bioeléctricas por India (14), Isla Mauricio (3), Isla Reunión (2), mientras que los restantes países mencionados poseen una individualmente.(Salomón, 2016)

El efecto del incremento de la eficiencia de los ciclos termodinámicos con el aumento de sus parámetros es conocido desde siglos pasados. Lo anterior se pone totalmente de manifiesto cuando en el ciclo termodinámico (Ciclo Rankine) que se utiliza en la industria azucarera, se incrementan la presión y temperatura en el vapor que generan las calderas para su empleo en las turbinas que producen la electricidad. Esto se traduce en un incremento de la cantidad de electricidad generada por unidad de masa de caña molida (kWh/t_c). Ahora bien, el incremento de los parámetros implica un incremento de los costos inversionistas y esto obliga a un balance entre incremento de la ganancia por aumento de la eficiencia y el referido incremento de los costos inversionistas. En resumen, el aumento de los parámetros, más que una decisión técnica es una decisión económica.(Dr.C. Angel M. Rubio González. , 2014)

El costo de una instalación de ese tipo se estima en 1,8 millones de dólares por megavatio instalado, para la adquisición de los equipos de las cinco áreas que las integran: plantas eléctrica (turbogeneradores), de vapor (calderas), de tratamiento de agua, y almacén de biomasa y enlace con el Sistema Electro energético Nacional (SEN). Si a ello se suman las obras de construcción y montaje la inversión puede ascender a dos millones 200 mil dólares. En realidad, son inversiones millonarias que se sustentan en el costo evitado al país en la generación de electricidad con petróleo en las plantas de la Unión Nacional Eléctrica (UNE), ya que la caña es un cultivo que almacena energía solar siete veces más que cualquier otra biomasa hasta producir una tonelada equivalente a petróleo por cada tonelada de azúcar fabricada. El programa de AZCUBA consiste en poner en marcha desde 2015 hasta 2030 no menos de 765 megavatios en 19 plantas bioeléctricas, tanto anexas a centrales azucareros o con remodelación de la base energética existente. Los ingenios

molerán durante (150 - 180) días/año, a no menos del 85% de su capacidad.(Salomón, 2016)

Actualmente el país negocia el montaje de tres bioeléctricas situadas en los ingenios Jesús Rabí, Ciro Redondo y 5 de Septiembre, la primera en el occidente y las otras dos en la zona central, las cuales pueden aportar conjuntamente unos 140 megavatios. La industria azucarera cubana, con una generación total de 626 gigavatios /hora, aporta hoy el 86% de la energía suministrada por las fuentes renovables en esta isla. El 14% restante corresponde a la eólica, fotovoltaica, hidroenergía y solar térmica.(Salomón, 2016)

1.3. -Esquemas energéticos más usados en la industria azucarera y en valor de los parámetros de trabajo de los mismos.

En la industria azucarera existen una serie de esquemas en la generación de energía, cada una con distintos parámetros de operación y difieren además en el tipo de tecnología que tienen instalada.

Dentro de los más usados se encuentran: Ciclo a vapor con turbina de contrapresión, convencional y más difundida (ver figura 1), ciclo de vapor con turbina de extracción-condensación con altos parámetros de vapor de 40-80 bar, tecnología comercial, moderna y eficiente(ver figura 2), ciclo combinado con gasificación del bagazo y ciclo combinado con turbina de gas y turbina de vapor (tecnología avanzada en etapa de demostración).(Alba, 2014). En el caso de la UEB “Carlos Baliño” la generación se produce con un ciclo de vapor con turbinas de contrapresión con algunas particularidades en la instalación, pues ambas turbinas están acopladas a generadores (ver figura 3).

Con el uso de este tipo de tecnologías en el mundo se obtienen índices de generación tanto de vapor como de electricidad por tonelada de caña molida, se

tomaran los siguientes datos de. (Alba, 2014). Como referencia para un posterior análisis:

- 1- Central azucarero típico -550 kg/t_c, 20 kWh/t_c de electricidad.
- 2- Fábricas modernas -350 kg/t_c y 50 kWh/t_c.
- 3- Centrales de Hawai-60 kWh/t_c (valor medio), algunos 100 kWh/t_c o más.

Además (Rein, 2007) expone que dado todos los problemas que afectan la cantidad de bagazo disponible para la producción de vapor en una base continua, la cantidad de bagazo disponible puede estar entre 22-35 t/100t_c, pero normalmente es más en el rango 25 a 30 t/100t_c. Así como a cantidad de vapor generada del bagazo depende de la eficacia de la caldera, la presión a que el vapor se genera y el valor calorífico (determinado por la humedad y volumen de la ceniza) del bagazo. Éstos varían de aproximadamente 2.4-1.9 t/t_b a la presión alta con el volumen de humedad de bagazo más alto. Esto arroja un índice de generación de vapor de 0.5805 tv/t_c o 580.5 kg/t_c.

Con respecto al índice de eficiencia de generación de energía eléctrica en la industria azucarera (Rein, 2007) expone los ejemplos de Pioneer en Australia con 30 kWh/t_c y estimaciones en Mauricio que asumen 28 kWh /t_c.

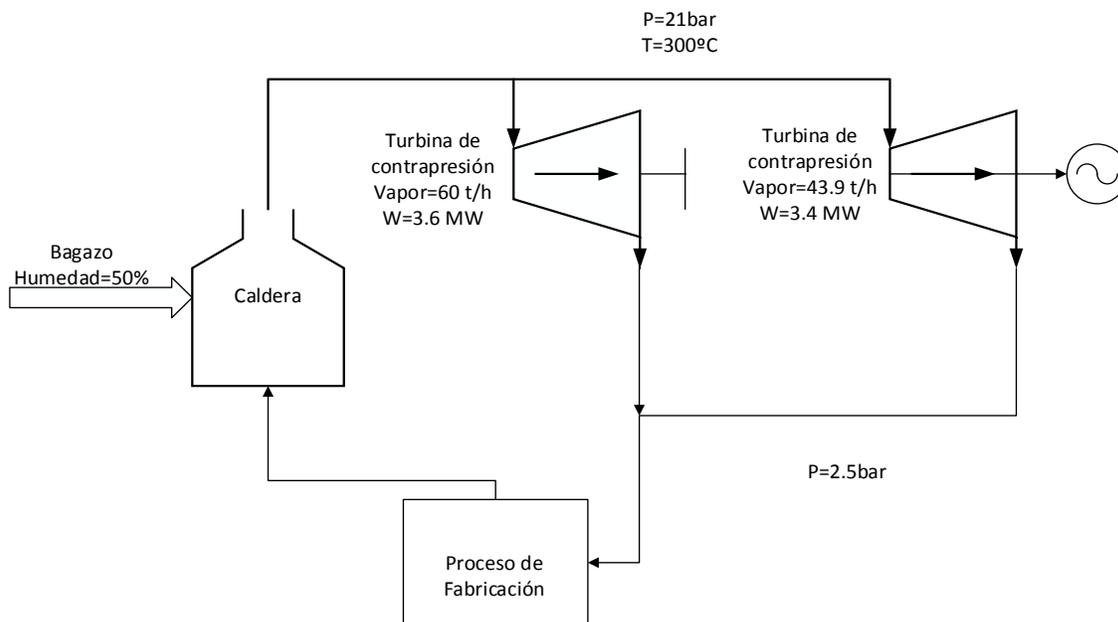


Figura 1: Esquema de generación con turbina de contrapresión.

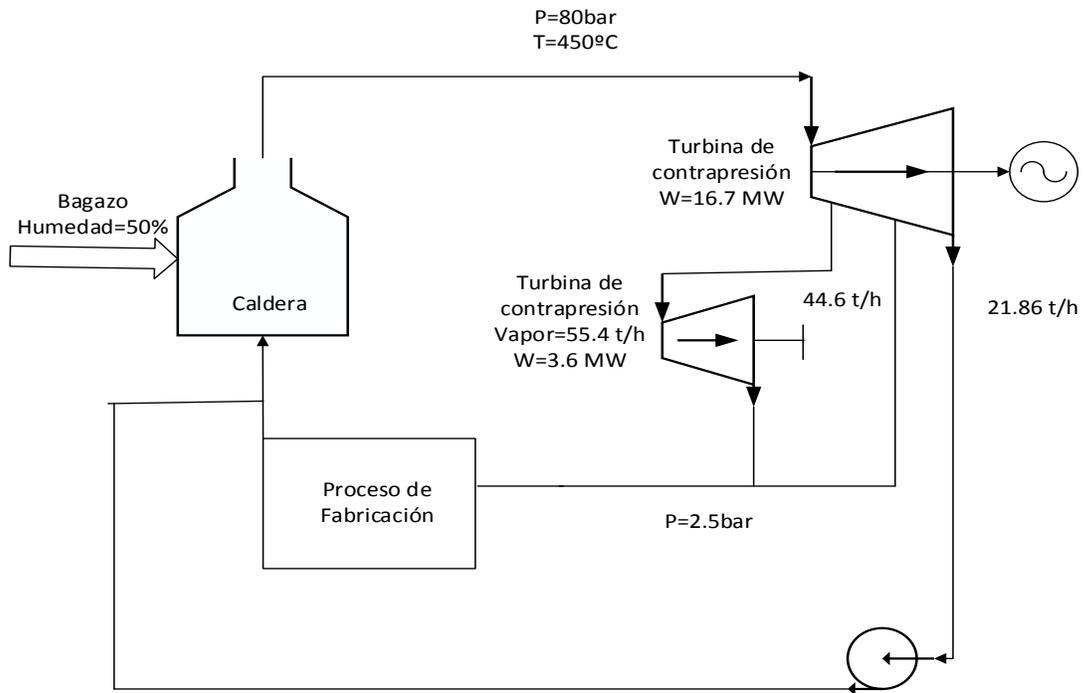
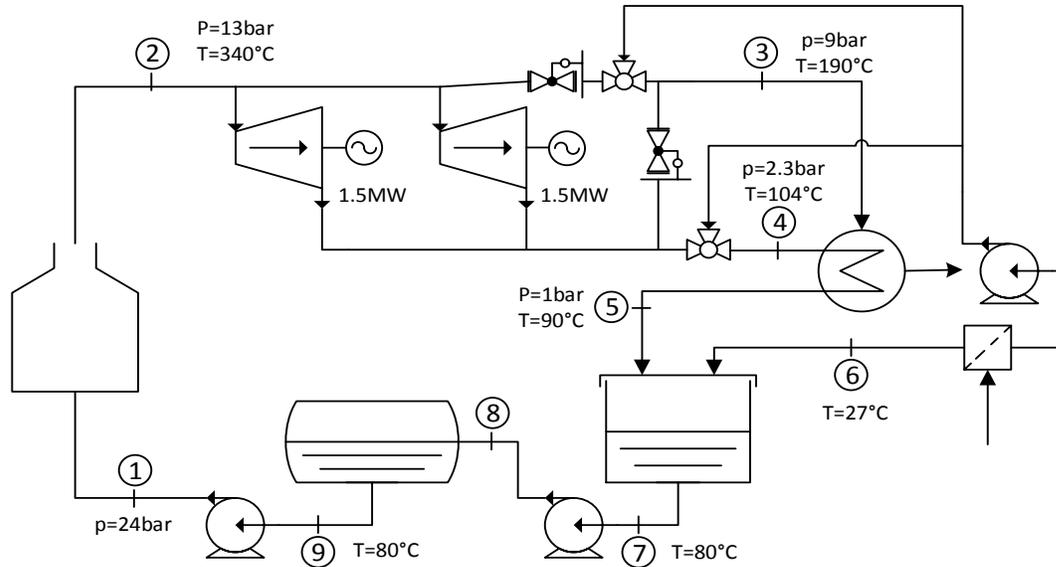


Figura 2: Esquema de generación con turbina de condensación con extracciones.

Basándose en (UEB Carlos Baliño, 2014) se elaboró el esquema de generación de energía actual del central azucarero, el cual representa un esquema de generación sencillo, con bajos parámetros de operación y una capacidad de generación mayor a la que se utiliza actualmente .



Legenda

	Caldera		Proceso
	Turogenerador		Tanque de condensado
	Válvula reductora		Tanque presurizado
	Válvula atemperadora		Bomba

Figura 3: Esquema de generación actual

1.4.-Variables de mayor influencia en los esquemas energéticos de la industria azucarera.

Toda industria que procesa materias primas, que genera y produce productos, que utiliza recursos tales como mano de obra, materiales y energía, debe medir continuamente la eficiencia con la que está utilizando dichos recursos. En un proceso de generación de energía (por escape o condensación), constantemente se transforman materias primas y combustibles para producir energía en forma de vapor y electricidad. El combustible es fundamentalmente bagazo, el cual proviene de la molienda de la caña de azúcar, éste se utiliza para producir vapor que es la fuerza motriz que a su vez genera electricidad. Por ello, es importante tener indicadores o

índices que midan el desempeño de los procesos, utilizando para ello razones de consumo y generación de vapor, electricidad, bagazo y caña. (Solares, 2011, Hugot, 1963)

El cálculo de los indicadores siguientes para cada una de las plantas en los ingenios, podría proporcionar una base que permita comparar correctamente el esfuerzo y desempeño de las mismas, además, su seguimiento oportuno representa una herramienta para evaluar posibles oportunidades de mejora. A continuación aparece una serie de índices e indicadores fundamentales para medir el desempeño de las operaciones y la eficiencia de una planta de generación de energía en un ingenio azucarero. (Solares, 2011)

Índice de consumo de vapor en las turbinas (ICG):

Es el consumo específico de vapor en las turbinas del proceso de generación de energía de acuerdo a una cantidad específica de caña molida. Con mayor eficiencia de turbina se disminuye el consumo de vapor en el proceso, se tendrán mayores excedentes de bagazo.

$$ICG = m_g / c_m \quad (Ec.1)$$

Donde:

m_g = consumo de vapor en las turbinas (kg/h)

c_m = cantidad de caña molida (kg/h)

ICG = kg_v / kg_c

Índice de generación de electricidad excedente (IGE):

Representa la energía eléctrica excedente y disponible para la venta u otros usos (de la generación total se resta el consumo interno) por la cantidad de caña molida. A mayor excedente de energía eléctrica mayores ingresos por aumento del volumen de venta a la red eléctrica nacional.

$$IGE = E_e / c_m \quad (Ec.2)$$

Donde:

E_e = energía generada menos consumo interno (kWh)

c_m = cantidad de caña molida (kg/h)

IGE= energía excedente disponible por hora (kWh/kg_c)

Índice de generación de vapor con bagazo (IGVb):

Representa la cantidad de vapor generado en calderas por la cantidad de bagazo utilizado como combustible. Representa el rendimiento del generador de vapor (caldera), a menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos, también representa el rendimiento de caldera. Este índice se mide por caldera o por todo el conjunto de calderas operando con bagazo.

$$IGV_b = m_v / m_b \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

m_v = cantidad de vapor generado en caldera (s), kg_v/h

m_b = cantidad de bagazo quemado en caldera (s) kg_b/h

$IGV_b = (\text{kg}_v/\text{kg}_b)$

Índice de generación de electricidad (GE):

Representa la energía eléctrica generada por la cantidad de caña molida.

$$GE = E_g / C_m \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

E_g = energía generada (kWh)

C_m = cantidad de caña molida (t_c)

$GE = \text{kWh}/t_c$

Índice de generación de vapor (GV):

Representa el vapor producido por la cantidad de caña molida.

$$GV = V_g / C_m \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

V_g = Vapor generado (kg)

C_m = cantidad de caña molida (t_c)

$GE = \text{kg}/t_c$

1.5.-Conclusiones del capítulo.

Se observan tendencias a nivel mundial y en Cuba, en cuanto a la implementación de esquemas de generación de energía eléctrica a partir de la biomasa cañera, lo cual es aplicable a sistemas con determinados parámetros de operación y altos índices de desempeño. Estos índices son evaluados rigurosamente en cada fábrica con el ánimo de buscar esquemas en los que sea factible la ejecución de estos proyectos.

Capítulo 2

Evaluación del sistema termo energético actual de la UEB
"Carlos Baliño.

En este capítulo se muestra en un primer momento las tecnologías usadas en la UEB tanto para la producción de vapor como en la generación de energía eléctrica. Luego se realiza un análisis del comportamiento de los principales índices en la industria en dos períodos de zafra distintos, con el objetivo de hacer una comparación entre ellos y con los indicadores de algunas industrias de este tipo en el mundo.

2.1- Caracterización de la producción de vapor.

A continuación se muestran los datos técnicos de la caldera instalada en la Unidad Empresarial de Base "Carlos Baliño" (Pérez, 1987) encargada de la producción de vapor utilizado tanto en los procesos como en la generación de energía eléctrica. Esta utiliza como combustible el bagazo que sale de los molinos; en el período comprendido del 25/12/2015 al 16/4/2016 la misma tuvo un consumo diario de aproximadamente 400 t_b, teniendo en cuenta que el arranque se realiza con leña. Consta de un sistema de operación y control asistido por computadora, lo que garantiza una óptima operación de la instalación. Además cuenta con un personal calificado para su explotación.

2.1.1.- Descripción del Generador de vapor.

La caldera CAP60 es una caldera de dos domos y horno de parrilla basculante y módulos de eficiencia, diseñada para la utilización del bagazo como combustible.

Horno:

El horno de la caldera está formado por:

Pantallas laterales, pantalla frontal, techo, pantalla trasera y piso del horno. Las pantallas laterales, frontal, trasera y el techo del horno están fabricados con tubos Ø 76 x 3.5 mm, de acero A-210, con un paso entre tubos de 110-140 mm y colectores fabricados con tubo Ø 273 x 14 mm. La mezcla vapor-agua es extraída de los colectores superiores de las pantallas laterales a través de los tubos evacuadores, que a su vez están conectados al domo superior. La pantalla frontal descarga la

mezcla vapor-agua directamente al domo. La pantalla trasera está fabricada formada por dos colectores: frontal y trasero, tubos del piso y tubos de la pantalla trasera.

El Sobrecalentador de vapor:

Es de tubo \varnothing 51 x 3.5 de acero SA-210 grado T11 (15 XM), este se ha instalado después del festón y se ha previsto el acceso para su instalación y mantenimiento. En el colector de vapor se han instalado los nipples necesarios para la instalación de termómetros, manómetros, válvula de seguridad y tomas para la instrumentación.

El haz caldera:

Es de tubos \varnothing 51 x 3. En este se ha dispuesto un diafragma vertical lo que garantiza el que los gases tengan un recorrido adecuado, el haz se ha dividido para su cálculo térmico en 4 partes, dos con bañado transversal y dos con bañado longitudinal. Los tubos del haz se fijan mediante mandrilado a los domos superior e inferior.

Domo superior:

Son fabricados con planchas de acero SA-515 grado 70, con un espesor de estas en la parte cilíndrico y en los casquetes de 34 mm.

La presión de trabajo es de 28.42 bar.

Presión de cálculo de 33.32 bar.

Diámetro interior 1500 mm. , longitud de la parte cilíndrica 9400 mm.

La masa de este es de 13865 kg.

Domo inferior:

Son fabricados con planchas de acero SA-515 grado 70, con un espesor de estas en la parte cilíndrico y en los casquetes de 26 mm.

La presión de trabajo es de 29.4 bar

Presión de cálculo de 35.28 bar

Diámetro interior 1000 m, longitud de la parte cilíndrica 7650 mm.

La masa de este es de 5756 kg.

La superficie recuperativa:

Está compuesta por un bloque de economizador y un calentador de aire.

El economizador:

Es fabricado con tubo \varnothing 32 x 3 de acero A-192 (20) y una superficie de 567 m².

El calentador de aire:

Es fabricado con tubo \varnothing 51 x 2, de acero SAE-1008 (acero 10) tiene una superficie de transferencia de 1638.4 m².

Este es de flujo combinado para aumentar la vida útil de este.

La estructura metálica:

El peso de la caldera es soportado por una estructura formada por columnas y vigas que permite la dilatación hacia abajo de ésta durante el calentamiento.

Pasillos y escaleras:

Los pasillos y las escaleras permiten el acceso a todas las áreas de la caldera tanto para la operación como el mantenimiento.

2.1.2.-Cálculos constructivos.

Estos valores sirven de una excelente ayuda en el diseño e instalación del generador de vapor, además de ser útiles a la hora de realizar los posteriores cálculos.

Horno:

Volumen del horno	368 m ²
Superficie total de las paredes	346.9 m ²
Superficie de radiación	262 m ²
Área de la parrilla	30.82 m ²
Tubos del horno	\varnothing 76 x 3.5 mm
Material	acero 20 ó SA-210 grado A1

Sobrecalentador de vapor:

Diámetro y espesor de los tubos	51x3.5 mm
Material de los tubos	aceroSA-213 grado T11 (15 XM)
Superficie de transferencia	236.7 m ²

Haz de caldera:

Diámetro y espesor de los tubos	51 x 3 mm
Material de los tubos	acero 20 ó SA-192
Superficie total de transferencia	1086 m ²

Economizador:

Diámetro y espesor de los tubos	32 x 3 mm
Material	acero 20 ó SA-192
Superficie de transferencia,	657 m ²

Calentador de aire:

Diámetro y espesor de los tubos	51 x 2 mm
Material	acero SAE-1008 (10)
Número de tubos	2674
Superficie de transferencia	1638.4 m

2.1.3.-Cálculos térmicos.

Los cálculos térmicos son indispensables en la realización de los balances energéticos que se realizan en el esquema de generación, usados en la selección de las tecnologías complementarias como son las tuberías de vapor, turbinas y diferentes accesorios que se utilizan en la instalación del mismo.

Balance:

Generación de vapor	60 t/h
Presión de vapor sobrecalentado	17.15 bar
Presión en el domo superior	17.64 bar
Temperatura de vapor sobrecalentado	320 ±20 °C

Temperatura de gases a la salida de la caldera	172 °C
Pérdidas por incombustión química	0.5 %
Pérdidas por incombustión mecánica	3.0 %
Pérdida por gases a la salida de la caldera	11.55 %
Eficiencia	82.5 %
Bagazo consumido	25629 kg/h
Volumen de gases por el VTI	184789 m ³ /h
Volumen de aire por el VTF (p)	61195m ³ /h
Volumen de aire por el VTF (s)	12238 m ³ /h
Índice de generación	2.34 kg _v /kg _b

Horno:

Temperatura de gases salida del horno	907 °C
Tensión térmica sobre parrilla	1476954 kcal/m ² h
Tensión térmica volumétrica	123600 kcal/m ² h
Velocidad de los gases	4.06 m/s
Temperatura adiabática de combustión	1320 °C

Sobrecalentador:

Temperatura gases antes de este	849 °C
Temperatura después de este	631°C
Velocidad de vapor	18.78 m/s
Velocidad de gases	8.55 m/s
Temperatura del vapor a la entrada	233 °C
Temperatura del vapor a la salida	320 ±20°C

Haz de caldera:

Temperatura de gases a la entrada	631 °C
Temperatura de gases a la salida	364 °C
Velocidad de los gases en 1	7.27 m/s
Velocidad de los gases en 2	6.5 m/s

Velocidad de los gases en 3	9.83 m/s
Velocidad de los gases en 4	18.72 m/s

Calentador de aire:

Temperatura del aire a la entrada	30 °C
Temperatura del aire a la salida	280 °C
Temperatura de gases a la entrada	364 °C
Temperatura de gases a la salida	238°C
Velocidad del aire	7.16 m/s
Velocidad de los gases	14.09 m/s

Economizador:

Temperatura del agua a la entrada	120°C
Temperatura del agua a la salida	153 °C
Temperatura de los gases a la entrada	238°C
Temperatura de los gases a la salida	172 °C
Velocidad del agua	0.71 m/s
Velocidad de los gases	8.11 m/s

2.1.4.-Cálculos aerodinámicos.

Los valores obtenidos en estos cálculos son el resultado de la configuración lograda en el interior del generador de vapor luego de su instalación.

Vacío a la salida del horno	1.96 bar
Caída de presión a través del Sobrecalentador	4.25 bar
Caída de presión a través del haz de caldera	33.72 bar
Caída de presión a través del economizador	16.66 bar
Caída de presión a través del calentador de aire	18.62 bar
Caída de presión a través de los dos giros	9.8 bar
Caída de presión a carga nominal	100.94 bar

Datos para seleccionar los ventiladores:

Cuando se instala a chimeneas de 60 m de altura el

VTI – Q= 265000 m³/h - P= 240 mmH₂O

VTF (p) = Q= 95200 m³/h - P= 305 mmH₂O

VTF (s) = Q= 12470 m³/h – P= 400 mmH₂O

Datos del agua de alimentación:

Dureza	dH ≤ 0.1
CO ₂	mg/L ≤ 30
O ₂	≤ 0.03 mg/L
Aceite	≤ 2 mg/L
Fe	≤ 0.1 mg/L
Solidos totales	≤ 2000 ppm
Valor de PH a 20 °C	mayor que 7

El agua de alimentación tiene que ser clara, transparente libre de partículas en suspensión y de trazas de azúcar.

Parámetros del agua de caldera:

P ₂ O ₅	≤ 20 mg/L
S ₁ O ₂	≤ 60 mg/L
Contenido total de sal	≤ 2500 mg/L

Sin trazas de azúcar y tiene que ser clara, transparente.

Características del combustible:

El combustible es bagazo cuya humedad debe estar en 50%.

Contenido elemental de trabajo del bagazo:

C= 23.5

H= 3.25

O= 22

Ceniza= 1.25

Humedad= 50%

El poder calórico para 50 % de humedad es 7640 kJ/kg.

Volumen de agua contenida en la caldera:

- 1- Llena hasta el centro geométrico del domo superior, a 25 °C -----47.2 m²
- 2- Con el domo superior y el Sobrecalentador de vapor llenos, a 25 °C----56.7 m²

Tabla 1: Distribución del aire en la caldera. (Para una generación de 60 t/h)

Aire por	Temp. del aire en °C	Volumen del aire en m ³ /s a		% de aire por	Coef. de exceso de aire	# de toberas	Sección de la tobera	Sección total de toberas	Vel. del aire en la punta de la tob. m/s
		30 °C	280°C						
Toberas sup. trasera	280	1.052	2.15	5.15	0.062	24	0.00161	0.03864	55
Tob. inf. trasera	280	1.052	2.15	5.15	0.062	24	0.00161	0.03864	55
Tob. . frontal	30	1.71		8.38	0.1	26	0.00121	0.034	54.35
Lanzadores	30	1.71	-	838	0.1	5	0.00812	0.0406	42.11
Bajo parrilla	280	14.89	30.08	72.9	0.875	15776		0.793	37.92
Total		20.41	-	100	1.2	-		-	

2.2.-Caracterización de la generación de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica se lleva a cabo con el empleo de dos generadores de 1.5 MW de potencia, acoplados a dos turbinas de contrapresión cuyos datos se muestran a continuación (ver tabla 2.). Estos generadores no siempre funcionan a su máxima potencia puesto que la generación de electricidad se encuentra condicionada a la demanda de energía de la instalación en general y en caso de alguna parada esta demanda se satisface consumiendo de la energía proveniente del SEN. Así como tampoco entregan constantemente electricidad al SEN, solo cuando existe un excedente estable. Por otra parte se debe señalar que las turbinas tienen como promedio un consumo de vapor de 19 t/h con un aprovechamiento de 69%.

2.2.1.-Descripción de las turbinas.

Estos turbogeneradores de 1.5 MW fueron fabricados en 1984 por VEB Bergmann-Borsig y exportados a Cuba por Techno Commerz desde Berlín para ser instalados en fábricas de azúcar. A continuación se muestran los datos técnicos y de operación (ver tabla 2) extraídos de (Bergmann-Borsig, 1984)

Tabla 2: Datos técnicos de las turbinas instaladas.

Tipo de turbina	SG 49/3/6 -1
Engranaje	Engranaje con dentadura inclinada doble
Potencia máxima nominal	1500 kW
Velocidad del rotor de la turbina	5437 rpm
Velocidad del engranaje del árbol de accionamiento	1800 rpm
Velocidad de cierre rápido	1980 rpm
Margen de ajuste de la velocidad con efecto de islote	aprox. 1620-1950 rpm
Presión a la entrada	normal:10.8 bar-186°C máxima:12 bar-240°C
Presión en la cámara de ruedas	normal:5.5 bar máxima:6.4 bar
Temperatura en la cámara de ruedas	normal aprox:155°C máxima aprox:210°C
Contrapresión	2 bar
Margen de ajuste	1.7-2.4 bar
Temperatura del vapor de escape	aprox. 120°C
Flujo máximo de vapor	27.75 t _v /h
Cantidad de vapor marchando en vacío	aprox. 7.2 t _v /h
Cantidad de escape de vapor a 0.11MPa	aprox. 120kg _v /h - 150°C

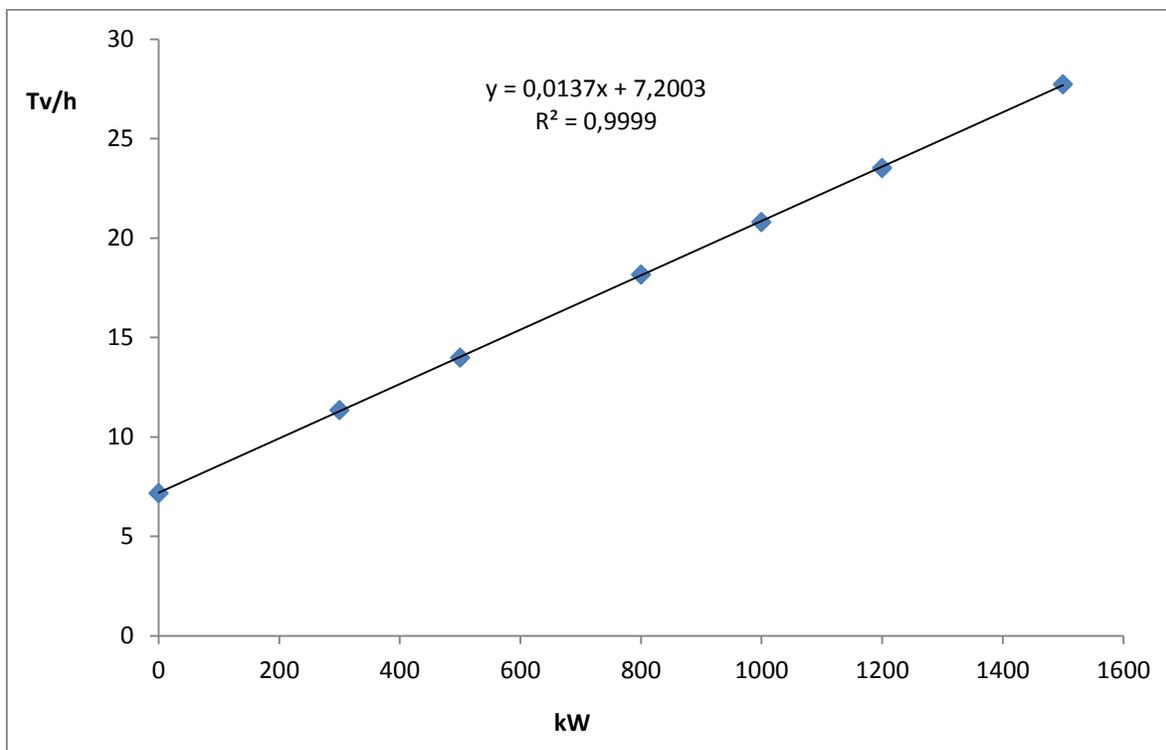


Figura 4: Diagrama de consumo de vapor de las turbinas

2.3.- Análisis del comportamiento de los principales índices en la industria.

A continuación se realizará un estudio de distintos períodos, correspondientes a las zafas 2014-2015 y 2015-2016 con el objetivo de realizar una comparación entre sus principales indicadores de eficiencia.

2.3.1-Análisis de la zafra 2014-2015.

Seguidamente se muestra un resumen de este período de zafra (ver tabla 3), en la cual se encuentran recogidos los principales resultados de la UEB, obtenidos de (Energético, 2014-2016, comercial).

Tabla 3: Resumen de la zafra 2014-2015

Generación	8594294 kWh
Consumo SEN	478361 kWh
Entrega SEN	1160251 kWh
Consumo propio	6955682 kWh
Caña molida	245380 t _c
Bagazo quemado	25.5 t _b /h
I.E (kWh/t _c)	4.73
I.C (kWh/t _c)	1.95

2.3.1.1- Cálculo de los índices de eficiencia.

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la industria en este período de zafra se procederá al cálculo de los principales índices de eficiencia. Haciendo primeramente una valoración del tiempo perdido en la industria recogidos por (Sala) (ver tabla 4).

Tabla 4: Evaluación de paradas

Causas	Cantidad de Paradas	Horas
Afectaciones por fenómenos naturales	32	281.7
Falta de caña	85	151.6
Afectaciones externas	30	63.9
Afectaciones por transporte del MINAZ	133	292.3
Limpieza y mantenimiento	5	45
Interrupciones operativas	101	255.9
Rotura o Deficiencias de equipos	96	260.4
Centro intermedio o de manipulación	9	17.3
Tiempo total perdido en la industria	491	1368

Del tiempo perdido total, valorando solo las paradas que afectaron la producción de vapor y energía eléctrica se incurre en un tiempo perdido de 970 horas equivalente a 40 días, por lo que de los 160 días de zafra solo se produjo energía en 120 días por lo que se nombrarán días efectivos. Por esta razón se tomará este valor en los cálculos posteriores.

Para las estimaciones del vapor producido en la caldera se toma que esta opera con una eficiencia del 65%, produce el mismo en condiciones de presión y temperatura

de 15 bar y 340°C, además tiene una entrada de agua a 70°C y utiliza como combustible bagazo con un 50% de humedad a razón de 24 t_b/h como promedio. Bajo estas condiciones se produce vapor a razón de 42 t_v/h con 24h de explotación en los 120 días efectivos la producción es de 120960t_v.

El consumo de vapor de las turbinas se estimó teniendo en cuenta un consumo horario promedio de 19 t_v/h cada una lo que suma entre 38 t_v/h ambas con un aprovechamiento de 69%, además este resultado se corroboró usando la curva de comportamiento del consumo de vapor en las turbinas (ver figura 1).

- Índice de consumo generación. (ICG)

$$ICG = m_g / c_m$$

$$ICG = 38000 / 85200$$

$$ICG = 0.45 \text{ kg}_v / \text{kg}_c$$

- Índice de generación de electricidad excedente. (IGE)

$$IGE = E_e / c_m$$

$$IGE = 1638612 / 85200$$

$$IGE = 19 \text{ kWh} / \text{kg}_c$$

- Índice de generación de vapor con bagazo. (IGVb)

$$IGV_b = m_v / m_b$$

$$IGV_b = 42000 / 25500$$

$$IGV_b = 1.65 \text{ kg}_v / \text{kg}_b$$

- Índice de generación de electricidad. (GE)

$$GE = E_g / C_m$$

$$GE = 8594294 / 245380$$

$$GE = 35 \text{ kWh} / t_c$$

- Índice de generación de vapor. (GV)

$$GV = V_v / C_m$$

$$GV = 120960000 / 245380$$

$$GV = 493 \text{ kg}_v / t_c$$

2.3.2-Análisis de la zafra 2015-2016

Seguidamente se muestra un resumen de este período de zafra (ver tabla 5), en la cual se encuentran recogidos los principales resultados de la UEB, obtenidos de (Energético, 2014-2016, comercial).

Tabla 5: Resumen de la zafra 2015-2016

Generación	5158689 kWh
Consumo SEN	491409 kWh
Entrega SEN	678435 kWh
Consumo propio	3988745 kWh
Caña molida	158656 t _c
Bagazo quemado	24 t _b /h
I.E (kWh/tc)	4.27
I.C (kWh/tc)	3.09

2.3.2.1- Cálculo de los índices de eficiencia.

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la industria en este período de zafra se procederá al cálculo de los principales índices de eficiencia. Haciendo primeramente una valoración del tiempo perdido en la industria recogidos por (Sala)(ver tabla 6).

Tabla 6: Evaluación de paradas

Causas	Cantidad de Paradas	Horas
Afectaciones por fenómenos naturales	32	390
Falta de caña	6	20.780
Afectaciones externas	9	40.387
Afectaciones por transporte del MINAZ	17	54.190
Limpieza y mantenimiento	2	14
Interrupciones operativas	230	364.848
Rotura o Deficiencias de equipos	78	164.602
Centro intermedio o de manipulación	9	21.220
Tiempo total perdido en la industria	383	1070

Del tiempo perdido total las valorando solo las paradas que afectaron la producción de vapor y energía eléctrica se incurre en un tiempo perdido de 954 horas equivalente a 39 días, por lo que de los 113 días de zafra solo se produjo energía en

74 días por lo que se nombrarán días efectivos. Por esta razón se tomará este valor en los cálculos posteriores.

Para las estimaciones del vapor producido en la caldera se tendrán en cuenta las mismas consideraciones anteriormente vista pero ahora en los 74 días efectivos de este período. Esto da como resultado una producción de 74592 tv.

Para el consumo de vapor de las turbinas se tienen en cuenta los mismos valores estimados en el anterior período.

- Índice de consumo generación. (ICG)

$$ICG = m_g / c_m$$

$$ICG = 38000 / 89000$$

$$ICG = 0.43 \text{ kg}_v / \text{kg}_c$$

- Índice de generación de electricidad excedente. (IGE)

$$IGE = E_e / c_m$$

$$IGE = 116994 / 89000$$

$$IGE = 13 \text{ kWh} / \text{kg}_c$$

- Índice de generación de vapor con bagazo. (IGVb)

$$IGV_b = m_v / m_b$$

$$IGV_b = 42000 / 24000$$

$$IGV_b = 1.75 \text{ kg}_v / \text{kg}_b$$

- Índice de generación de electricidad. (GE)

$$GE = E_g / C_m$$

$$GE = 5158689 / 158656$$

$$GE = 32 \text{ kWh} / t_c$$

- Índice de generación de vapor. (GV)

$$GV = V_p / C_m$$

$$GV = 74592000 / 158656$$

$$GV = 470 \text{ kg} / t_c$$

2.4.-Análisis de los índices de generación con respecto a otras industrias azucareras.

Algo medular dentro de la industria azucarera es el índice de generación de energía eléctrica, la UEB “Carlos Baliño” se encuentra dentro de los promedios respecto a otras en el mundo con valores entre 30-35 kWh/t_c (ver figura 2), aunque se debe valorar las posibilidades de mejoras en el sistema de generación de electricidad para alcanzar mejores resultados.

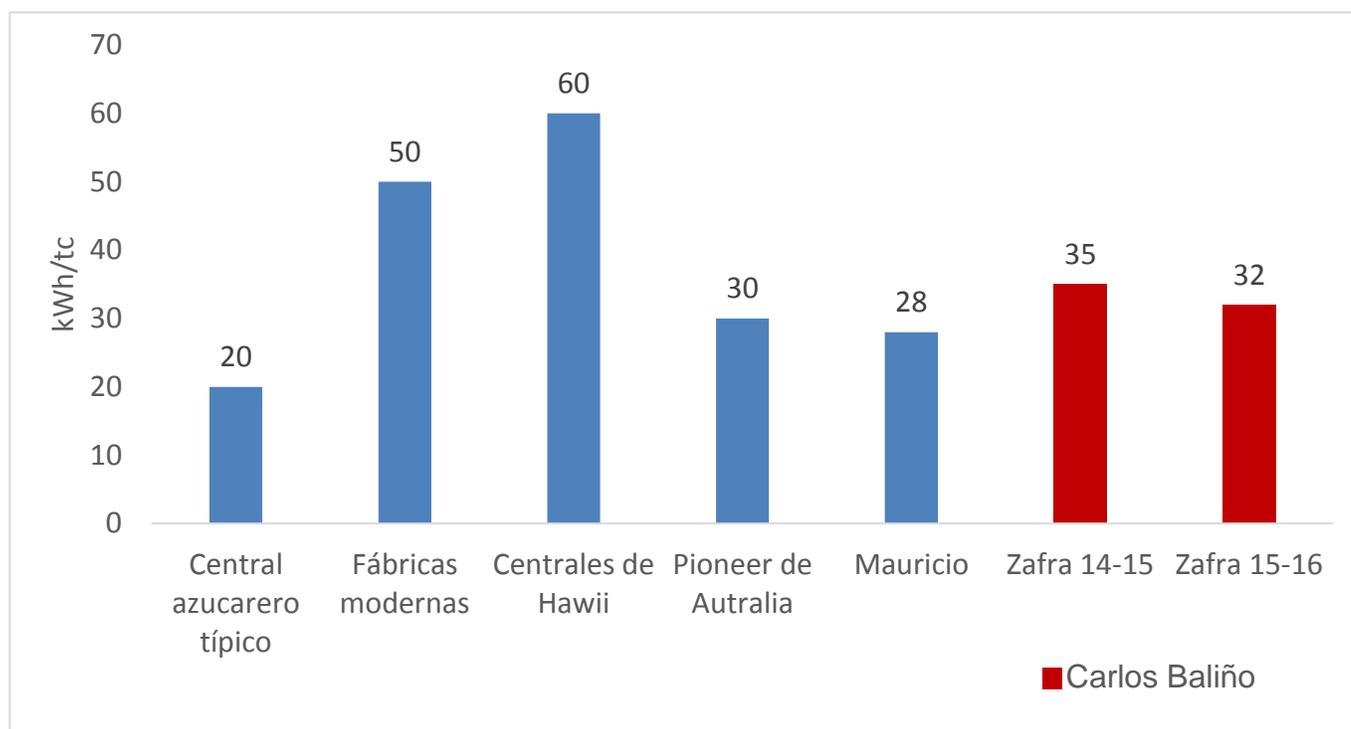


Figura 5: Análisis del índice de generación de electricidad

Toda industria azucarera se sustenta energéticamente en la producción de vapor por lo que un alto valor en el índice de generación de vapor sería lo ideal. Luego de realizar una comparación (ver Figura 3), la UEB “Carlos Baliño” con un valores entre 470-500 kg/t_c se encuentra por debajo de los centrales típicos aunque no difiere en gran medida y por encima de las fábricas modernas. Por lo que a modo de conclusión se puede afirmar que esta industria necesita implementar un plan de mejoras que le

permita disminuir este índice con el objetivo de alcanzar una mayor eficiencia en la generación de vapor.

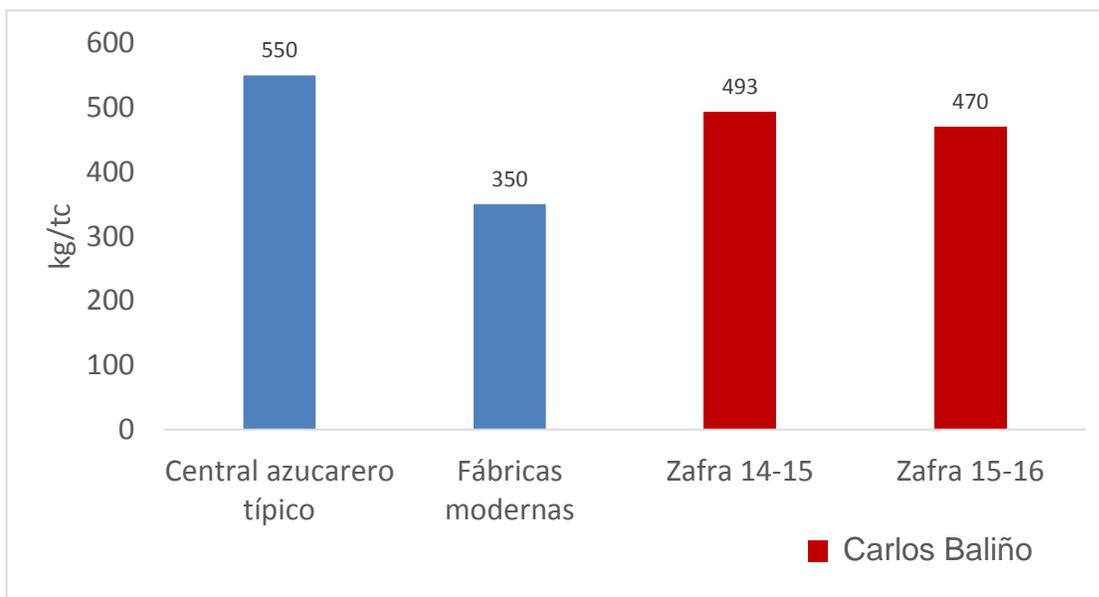


Figura 6: Análisis del índice de generación de vapor

2.5.- Conclusiones del capítulo.

A modo de comparación a continuación se relacionan los resultados anteriormente obtenidos (ver tabla 7).

Tabla 7: Tabla comparativa

Índice	Zafra 2014-2015	Zafra 2015-2016
Índice de consumo generación	0,45 kg _v /kg _c	0.43 kg _v /kg _c
Índice de generación de electricidad excedente	19 kWh/kg _c	13 kWh/kg _c
Índice de generación de vapor con bagazo	1.65 kg _v /kg _b	1.75 kg _v /kg _b
Índice de generación de electricidad	35 kWh/t _c	32 kWh/t _c
Índice de generación de vapor	493 kg/t _c	470 kg/t _c

La esencia del consumo específico de vapor en las turbinas en el proceso de generación de energía de acuerdo a una cantidad específica de caña molida es que con mayor eficiencia en la turbina se disminuye el consumo de vapor en el proceso,

por lo que se tendrán mayores excedentes de bagazo. En este aspecto no es muy significativa la diferencia entre los períodos, pues la misma es de solo 0.02.

El índice de generación de electricidad excedente representa la energía eléctrica excedente y disponible para la venta por la cantidad de caña molida. A mayor excedente de energía eléctrica mayores ingresos por aumento del volumen de venta a la red eléctrica nacional. En este punto sucede al igual que en el anterior que existe muy poca diferencia entre ambos períodos.

El índice de generación de vapor con bagazo representa la cantidad de vapor generado en calderas por la cantidad de bagazo utilizado como combustible, así como el rendimiento del generador de vapor (caldera). A menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos. Según los resultados ambos períodos operaron con rendimientos muy similares.

Desde el punto de vista de los índices de generación de electricidad y generación vapor por tonelada de caña molida no existen grandes diferencias entre los períodos.

Capítulo 3

Potencial de mejoras del ciclo, implicaciones económicas y ambientales.

3.1.- Identificación de potencialidades para elevar la eficiencia energética.

Para el logro de mejores resultados en la eficiencia de la generación de energía eléctrica en la UEB “Carlos Baliño” se debe trabajar en base las potencialidades de mejoras que se presenta a continuación, las cuales fueron identificadas durante la evaluación de su sistema termo energético.

-Las condiciones de almacenamiento del bagazo puesto que actualmente no se encuentra totalmente protegido de la lluvia, el aumentar la humedad del mismo trae consigo pérdidas en la eficiencia de la caldera y en ocasiones su parada.

-Tras la aplicación de un Diagnóstico Energético Nivel 1 se detectó que:

- Existen pases de los gases en la parte trasera por lo que se infiltra aire frío.
- Tubo de salida de vapor de la caldera con un déficit de revestimiento en una longitud de 26 m.
- Módulo de eficiencia con un área de 32 m² sin revestimiento.

-Por la noche si no se está trabajando dejar solo el alumbrado que requiera la protección de los objetivos.

-Reparación adecuada de todo el equipamiento que garantice su buen funcionamiento y reduzca el tiempo perdido el cual es enemigo de la eficiencia energética.

-Realizar la entrega al SEN mientras exista un excedente en la generación de electricidad.

-De ser posible aumentar la capacidad de generación instalando generadores con una potencia mayor a 1,5 MW.

-Usar un ciclo regenerativo para aumentar la temperatura del agua de alimentar la caldera

3.1.1-Propuesta de un nuevo esquema de generación con la implementación de un ciclo regenerativo.

A continuación se muestra la propuesta de un nuevo esquema de generación (ver figura 5), este tiene implementado un ciclo regenerativo pues se aumenta la capacidad de generación de uno de los generadores de 1.5 MW a 3 MW. Debido a esto también se aumenta la cantidad de vapor en el escape de las turbinas. El vapor excedente que no es necesario enviar a proceso es enviado a un tanque presurizado a través de una nueva tubería instalada con un controlador de flujo en caso de un exceso de vapor. Este funciona como cámara de mezclado la cual se encarga de calentar el agua proveniente del condensado recogido y el agua de reposición para luego enviarla a la caldera.

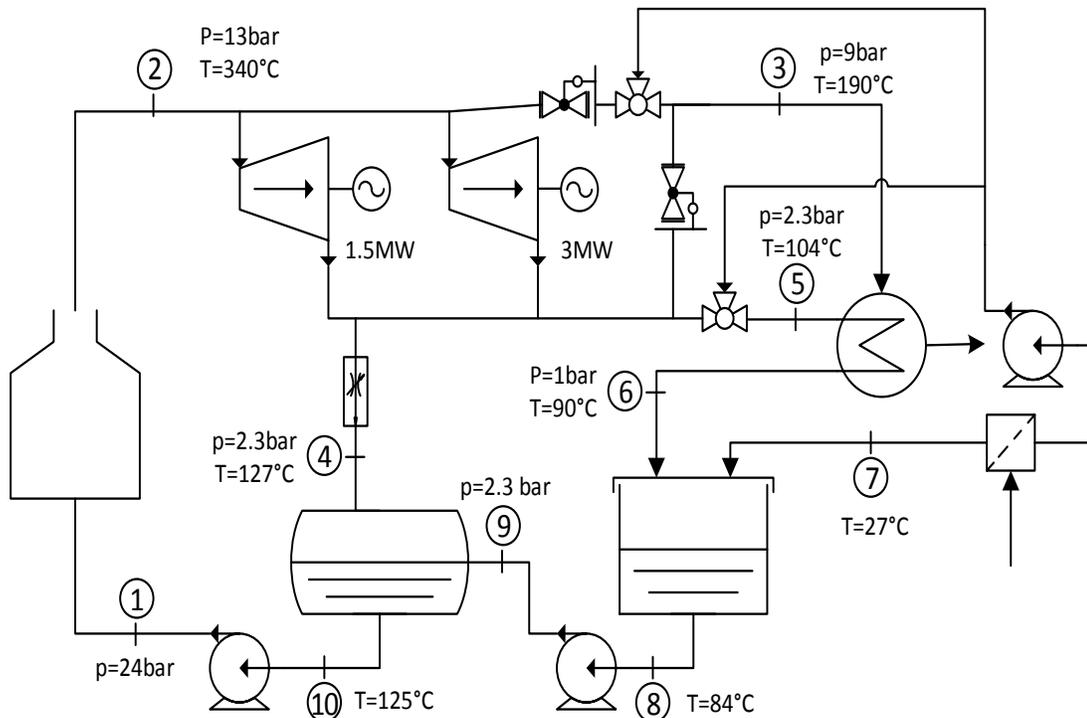


Figura 7: Esquema de generación con ciclo regenerativo.

3.1.1.1-Pérdidas de calor en la tubería de vapor sin aislamiento térmico.

A continuación se realiza el cálculo de las pérdidas de calor en los 26 m de tubería de vapor que se encuentran sin revestimiento.

Tabla 8: Variables para el cálculo de las pérdidas en la tubería de vapor.

Variable	Designación	Magnitud
Cantidad de calor	Q(kW)	¿?
Pérdida de calor	q'(kW)	¿?
Coefficiente de transferencia térmica	h(W/m ² °C)	15
Área superficial	A(m ²)	25
Temperatura de la superficie(sin revestimiento)	T _s (°C)	200
Temperatura de la superficie(con revestimiento)	T _s (°C)	40
Temperatura del sumidero	T _∞ (°C)	27
Diámetro	D(m)	0.3
Longitud	L(m)	26

Pérdidas sin aislamiento:

Para la realización de los balances de masa y energía, así como los cálculos de eficiencias se han tomado las ecuaciones de (Cengel, 2009, Faires, 1983, F.P.Incropera, 1996)

$$Q = h * A(T_s - T_{\infty}) \quad (\text{Ec.6})$$

$$Q = 15W/m^2\text{°C} * 25m^2(200\text{°C} - 27\text{°C})$$

$$Q = 65kW$$

Pérdidas con aislamiento (debe de garantizar como valor normalizado 40°C en la superficie).

$$Q = h * A(T_s - T_{\infty})$$

$$Q = 15W/m^2\text{°C} * 25m^2(40\text{°C} - 27\text{°C})$$

$$Q = 5kW$$

Pérdidas por unidad de longitud

Sin revestimiento

$$q = h * \pi * L * D * (T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec.7})$$

$$q' = \frac{q}{L} = 15W/m^2\text{C} * \pi * 0.3m(200^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})$$

$$q' = 2.45kW/m$$

Con revestimiento

$$q = h * \pi * L * D * (T_s - T_\infty)$$

$$q' = \frac{q}{L} = 15W/m^2\text{C} * \pi * 0.3m(40^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})$$

$$q' = 0.18kW/m$$

3.1.2-Análisis del esquema de generación propuesto.

En un primer momento se realizan valoraciones puntuales acerca del estado técnico del generador de vapor, así como las pérdidas de calor en su instalación, para luego proceder al cálculo de la eficiencia con que opera actualmente.

Condiciones técnicas de la caldera:

- Existen pases de los gases en la parte trasera por lo que se infiltra aire frío, esto representa una pérdida de calor aproximada de un 5-10%.
 - El ventilador de tiro inducido (VTI) posee problemas en el cono de succión debido al régimen de trabajo del mismo.
 - Tubo de salida de vapor de la caldera con un déficit de revestimiento en una longitud de 26 m.
 - Módulo de eficiencia con un área de 32 m² sin revestimiento
- ✓ Se recupera un 90% del condensado, el otro 10% se expulsa al ambiente en forma de vapor o se pierde por contaminación.

Tabla 9: Características del agua de reposición.

temperatura	60-70°C
presión	22-26 bar
\dot{m}	$\approx 13 \text{ ta/h}$

Cálculo de eficiencia de la caldera:

Tabla 10: Variables para el cálculo de eficiencia en la caldera.

Variable	Designación	Magnitud
Flujo másico de vapor	\dot{m}_{vs} (kg/h)	42000
Flujo másico de bagazo	\dot{m}_b (kg/h)	24000
Calor específico del bagazo	Q(kJ/kg)	7640
Entalpía del vapor sobrecalentado	h_{vs} (kJ/kg)	3124,8
Entalpía del agua	h_{H_2O} (kJ/kg)	294.8
Eficiencia	η (%)	¿?

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{H_2O})}{\dot{m}_b * Q} * 100 \% \quad (\text{Ec.8})$$

$$\eta = \frac{42000 \text{ kg/h} * (3124,8 \text{ kJ/kg} - 294,8 \text{ kJ/kg})}{24000 \text{ kg/h} * 7640 \text{ kJ/kg}} * 100 \%$$

$$\eta = \frac{118860000 \text{ kJ/h}}{183360000 \text{ kJ/h}} * 100 \%$$

$$\eta = 65 \%$$

3.1.2.1-Análisis en las turbinas.

Luego para la selección del nuevo turbogenerador se realiza el cálculo de la eficiencia isentrópica del mismo teniendo como datos las variables de entrada y salida del vapor en el mismo, extraídos de(Keennan, 1988) los cuales se muestran a continuación (ver tabla 11)

Tabla 11: Variables para el cálculo de la eficiencia isentrópica.

Estado	Presión(bar)	Temperatura(°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía(kJ/kgK)
1	13	340	3130.5	7.1396
2	2.3	127	2717.7	7.1396
	S_f (kJ/kgK)	S_{fg} (kJ/kgK)	h_f (kJ/kg)	h_{fg} (kJ/kg)
2s	1.4337	5.7894	467.13	2226.0

$$x_{2s} = \frac{S_{2s} - S_f}{S_{fg}} \quad (\text{Ec.9})$$

$$x_{2s} = 0.990$$

Luego:

$$h_{2s} = h_f + x_{2s} * h_{fg} \quad (\text{Ec.10})$$

$$h_{2s} = 2670.87 \text{ kJ/kg}$$

Con estos valores entonces se procede al cálculo de la eficiencia:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} * 100 \quad (\text{Ec.11})$$

$$\eta_t = 88\%$$

Utilizando este valor de eficiencia isentrópica y los de las variables de entrada y salida de la turbina se selecciona por medio del programa Turbine Steam - Consumption Calculator un turbogenerador con una potencia de 3 MW y un consumo de vapor de 32 t/h. Para lograr este régimen de generación se debe elevar la producción de vapor al máximo, o sea 60 t/h, lo que implicaría aumentar el consumo de bagazo. A continuación se calcula el consumo de bagazo necesario usando la Ec.8 con la eficiencia actual de la caldera de un 65%.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{H_2O})}{\dot{m}_b * Q}$$

Luego:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{H_2O})}{\eta * Q}$$

$$\dot{m}_b = 34 \text{ t/h}$$

Este consumo de bagazo es demasiado alto puesto que con una capacidad de molienda de 2358 t/día el máximo producido es de 29.5 t/h, por esta razón se desea aumentar la temperatura del agua de alimentar la caldera para alcanzar una mayor eficiencia de la misma.

Como se mencionaba anteriormente se debe aumentar la producción de vapor, al menos al 77% lo que implicaría 46 t/h. De las cuales 42 son demandadas por los turbogeneradores de las cuales 38 t/h son enviadas a proceso a la salida de los turbos, 4 t/h son enviadas directamente de la caldera a proceso y las restantes 4 t/h se enviarían a la cámara de mezclado para calentar el agua de alimentar la caldera. Aunque esto llevaría los niveles de generación de electricidad al 89% de su capacidad, este valor estará un 25 % por encima del nivel de aprovechamiento actual. Cabe preguntarse ¿alcanzará una temperatura adecuada el agua de alimentación? Para responder a esta interrogante se procederá a realizar un balance en el tanque de condensado y posteriormente en la cámara de mezclado.

3.1.2.2-Balance de energía en el tanque de condensado.

Es importante aclarar que de todo el condensado que se genera solo se logra recuperar el 90% y el otro 10% se cubre con agua de reposición. A continuación se presenta el esquema de análisis así como los valores de las variables de los diferentes puntos relacionados con el tanque de condensado (ver tabla 12)

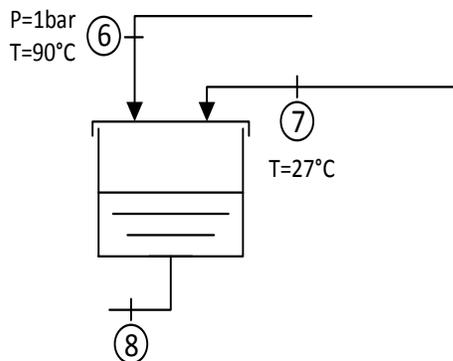


Tabla 12: Variables para el balance de energía en el tanque de condensado.

Puntos	\dot{m} (t/h)	p(bar, abs)	T (°C)	h(kJ/kg)
6	34.2	1	90	376.99
7	3.8	1	27	113.29
8	38	1	84	350.62

El valor de h en rojo se obtuvo a través de la Ec.12 que resultó del balance de energía realizado.

$$\dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_7 * h_7 = \dot{m}_8 * h_8 \quad (\text{Ec.12})$$

$$h_8 = \frac{\dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_7 * h_7}{\dot{m}_8}$$

3.1.2.3-Balance de energía en la cámara de mezclado.

La cámara de mezcla do es la encargada de calentar el agua proveniente del tanque de condensado usando el vapor de escape excedente de las turbinas, de esta manera se entrega a la caldera agua a mayor temperatura. Esto trae como consecuencia un mejoramiento en la eficiencia de la misma.

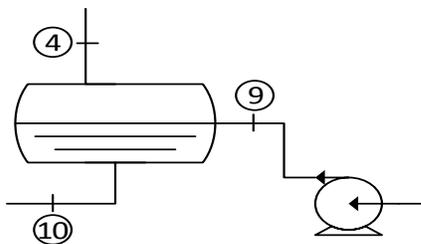


Tabla 13: Variables para el balance en la cámara de mezclado.

Puntos	\dot{m} (t/h)	p(bar, abs)	T (°C)	h(kJ/kg)
4	4	2.3	127	2717.74
8	38	1	84	350.62
9	38	2.3	84	350.63
10	42	2.3	125	576.06

En el punto 9 hay un aumento de entalpía debido al trabajo realizado por la bomba calculado por la Ec.13, donde $\bar{v} = 0.001029m^3/kg$.

$$h_9 = h_8 + (\bar{v} * \Delta p) \quad (\text{Ec.13})$$

Para el cálculo de las variables a la salida de la cámara de mezclado se usa la Ec.14 resultante del balance de energía.

$$\dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_9 * h_9 = \dot{m}_{10} * h_{10} \quad (\text{Ec.14})$$

$$h_{10} = \frac{\dot{m}_4 * h_4 + \dot{m}_9 * h_9}{\dot{m}_{10}}$$

3.1.2.4-Balance en la bomba de alimentación a la caldera.

Producto del trabajo de la bomba colocada a la entrada de la caldera para garantizar la presión correspondiente se produce un aumento en la entalpía del agua de alimentación calculada a través de la Ec.13, donde $\bar{v} = 0.001066 \text{ m}^3/\text{kg}$.

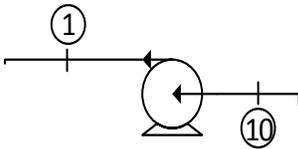


Tabla 14: variables para el balance en la bomba de alimentar la caldera.

Puntos	$\dot{m}(\text{t/h})$	$p(\text{bar, abs})$	$T (^{\circ}\text{C})$	$h(\text{kJ/kg})$
1	46.5	24	125	576.083
10	46.5	2.3	125	576.060

$$h_1 = h_{10} + (\bar{v} * \Delta p)$$

Con esta nueva entalpía a la entrada de la caldera se recalcula el consumo de bagazo horario, de igual manera usando la Ec.8.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{H_2O})}{\dot{m}_b * Q}$$

Luego:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_{vs} * (h_{vs} - h_{H_2O})}{\eta * Q}$$

$$\dot{m}_b = 23.7t/h$$

De esta manera queda solucionado el problema del consumo excesivo de bagazo de la caldera, aumentando la temperatura del agua de alimentación. Puesto que este queda reducido al 80% del que se produjera al 100% de la capacidad de molida.

3.2.-Evaluación de las implicaciones ambientales y económicas.

Toda tecnología usada por el hombre para generar energía eléctrica basada en la quema de un combustible genera cierto impacto tanto en el medio ambiente circundante, como un costo en la economía de la industria de generación por concepto de uso de un combustible u otro.

3.2.1.-Implicaciones ambientales.

El impetuoso crecimiento de la sociedad contemporánea, condicionado por el alto nivel de desarrollo científico técnico se asocia con daños cada vez mayores a las condiciones ambientales en las que el hombre se ha adaptado a vivir. La calidad del medio ambiente atmosférico, interpretadas como el conjunto de características físicas (relacionadas con el clima) y químicas (relacionadas con la contaminación del aire) de la atmósfera producto de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, no escapa de esta situación. Hoy se puede asegurar que producto de la acción humana se está modificando la composición química y física de nuestra atmósfera, introduciendo transformaciones que pueden variar el clima actual, no sólo en el ámbito local sino también a escala global. Estas modificaciones se reflejan, además, en el rápido deterioro de los materiales y en afectaciones de diverso grado al medio ambiente y a la salud humana.(CITMA, octubre, 2001)

Los efectos que se manifiestan a nivel global tienen incidencia en el incremento del efecto invernadero que ha ocasionado cambios climáticos, originando por la presencia en la atmósfera de gases que tienen la capacidad de absorber y remitir la radiación terrestre, como el dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), cloro-flúor-carbono (CFC) y el metano (CH₄). Por otra parte se destacan los procesos de destrucción de la capa de ozono, que han provocado el incremento de los niveles de radiación ultravioleta que alcanzan la superficie de la tierra, los cuales no se habían visto mayormente marcados hasta que la sociedad moderna comenzó la producción de determinados compuestos, CFC, que alteraron el balance de formación y destrucción de ozono. Además, el desarrollo científico técnico ha conducido a la modificación de la composición química de la tropósfera, causada por la deposición ácida atmosférica, y provocada por las emisiones industriales como dióxido de azufre (SO₂) y los compuestos nitrogenados (NO_x), que son contribuyentes principales de la presencia de los ácidos fuertes, tales como sulfúricos y nítricos en las lluvias ácidas.(Unday, 2005)

La industria azucarera aspira a convertirse en la principal fuente de energía limpia en Cuba, como parte de un programa de desarrollo de fuentes renovables con el que se pretende disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados y proteger el ambiente. El proyecto se inserta en los planes de modernización de los ingenios abiertos a inversión extranjera por AZCUBA, el estatal grupo empresarial que en 2011 sustituyó al Ministerio del Azúcar. Tradicionalmente, los centrales azucareros ya generan la electricidad para su autoconsumo, a partir de desechos como el bagazo, el residuo tras la trituración. El CO₂ que se produce en la generación de electricidad a partir de la quema del bagazo es aproximadamente el mismo que absorbe la caña en su proceso de crecimiento, por tanto hay un cierto equilibrio ambiental(Gutiérrez, 2013) (ver figura 7), esto sin la realización de un análisis de ciclo de vida del mismo.

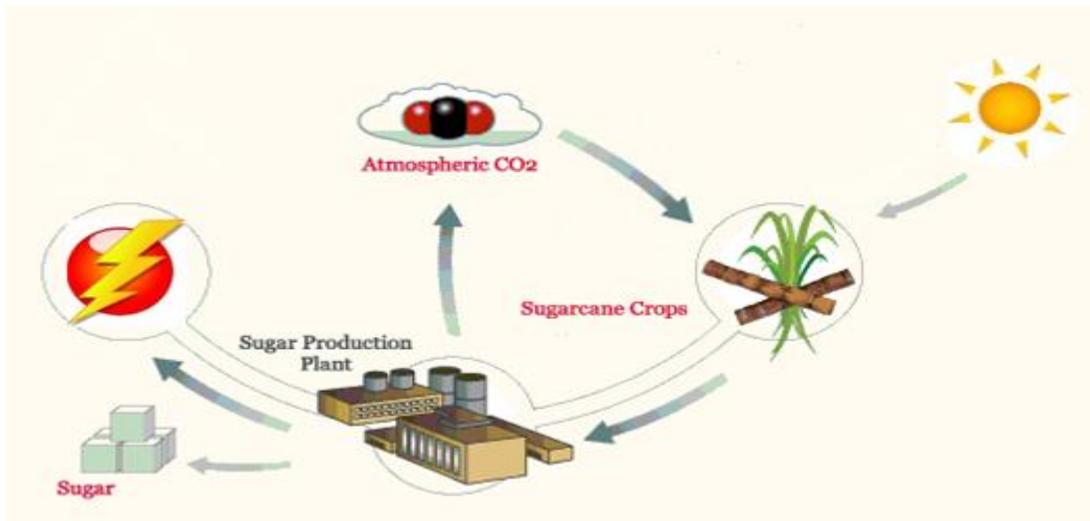


Figura 6: Ciclo del CO₂ en la generación eléctrica a partir de la quema de bagazo.

A decir de (WWF, 1995) se estima que anualmente son liberados a la atmósfera más de 28 billones de toneladas de CO₂, de estas alrededor de 22,4 billones de toneladas provienen de la quema de combustibles fósiles y 6 billones de toneladas son liberados de la quema de bosques tropicales y otras quemadas de biomasa. Como es apreciable se incurre en una menor medida de emisiones de CO₂ al quemar biomasa, por lo que la generación de electricidad usando la energía proveniente de esta reduce la contaminación ambiental.

Aunque es válido señalar que en el caso específico del uso del bagazo trae también consecuencias perjudiciales para la salud del hombre pues en primer lugar dentro de las instalaciones que lo usan como combustible, en este caso un central azucarero se puede apreciar que se encuentran en el aire pequeñas partículas provenientes del mismo; esto es a lo que se le llama bagacillo el cual afecta las vías respiratorias. Además luego de ser quemado de las chimeneas de las calderas se puede ver salir un hollín que de igual manera afecta al hombre en su salud, también se ve como un problema en los bateyes aledaños a las industrias azucareras pues trae consigo cierto nivel de suciedad.

El equivalente de emisiones de CO₂ aproximada es de 3 toneladas por cada tonelada de combustible. En la UEB aunque existen emisiones por la quema del bagazo, con

un ahorro de 5.5 toneladas de petróleo diarias se dejan de emitir a la atmósfera aproximadamente 16.5 toneladas de CO₂ por día.

3.2.2.-Implicaciones económicas.

El consumo específico de combustible del SEN es de 250 g/kWh; con una generación excedente de 22000 kWh se evitaría al país 5.5 toneladas de petróleo diarias. Además el costo de la energía eléctrica del SEN es de 0.22 USD/kWh, por lo que con la realización de este trabajo se ahorran al país 10.5 MMUSD.

Luego de realizado el proyecto de mejoras para el sistema termo energético de la UEB "Carlos Baliño", a continuación se muestran los resultados de un análisis económico (ver tabla 15) tomando como punto de partida la generación excedente, o sea, lo que se logra generar por encima de la capacidad que se encontraba anteriormente instalada; así como un período de zafra promedio de 145 días con 22 horas de operación diarias. Los costos y precios de venta fueron tomados de (Morales, 2016) para usarlos en los cálculos posteriores.

Tabla 15: Análisis económico del proyecto de mejoras

Potencia adicional (kW)	1000
Días de zafra	145
Hora de operación-día (horas)	22
Costo de la energía SEN (USD/kWh)	0,22
Precio de venta de energía eléctrica en las bioeléctricas (USD/kWh)	0,15
Duración del proyecto (DP) en (Años)	15
Energía generada en una zafra (kWh/año)	3190000
Energía generada durante el proyecto (kWh/DP)	47850000
Costo evitado al país anual (USD)	701800
Costo evitado al país en el tiempo de duración del proyecto (USD)	10527000
Ingreso generados anual (USD)	478500
Ingreso generados en el tiempo de duración del proyecto (USD)	7177500

En la realización de este proyecto de mejoras se tienen en cuenta las siguientes consideraciones en la inversión, con precios tomados de (CATÁLOGO, 2016) para la realización del mismo (ver tabla 16).

Tabla 16: Costos de inversión.

Inversión	Costo en USD
Cambio de generador	1500000
<u>Otras instalaciones</u>	
-Nuevas tuberías de vapor	150000
-Aislamiento térmico para las tuberías	
-Válvula controladora de flujo	
-Mano de obra de la instalación	
Total	1650000

Para un análisis del período de recuperación simple (PRS) tenemos en cuenta la razón entre el costo total de la inversión (CTI) y el aporte anual (AA).

$$PRS = \frac{CTI}{AA}$$

$$PRS = \frac{1650000 \text{ USD}}{701800 \text{ USD/año}}$$

$$PRS = 2.35 \text{ años}$$

Conclusiones

1. La UEB “Carlos Baliño” con valores entre 470-500 kg/tc se encuentra por debajo de los Centrales típicos, aunque no difiere en gran medida y por encima de las fábricas modernas. Por lo que se puede afirmar que esta industria necesita implementar un plan de mejoras que le permita disminuir este índice con el objetivo de alcanzar una mayor eficiencia en la generación de vapor.
2. En cuanto al índice de generación de energía eléctrica, la UEB “Carlos Baliño” se encuentra dentro de los promedios respecto a otras en el mundo con valores entre 30-35 kWh/tc, aunque se debe valorar las posibilidades de mejoras en el sistema de generación de electricidad para alcanzar mejores resultados.
3. El bagazo representa un acertado sustituto del petróleo como combustible en la generación de energía eléctrica, pues esta es una energía renovable a un bajo costo y con un bajo grado de emisiones de CO₂.
4. Con la implementación de la propuesta del potencial de mejoras la UEB podrá aumentar tanto la eficiencia del sistema termo energético como su capacidad de generación teniendo 1 MW de energía eléctrica excedente disponible para la venta.

Recomendaciones

1-Realizar un estudio posterior sobre la eficiencia de los usos del vapor en los diferentes proceso de fabricación de azúcar.

2-Dar continuidad a la búsqueda de un potencial de mejoras de la UEB “Carlos Baliño” con el objetivo de elevar su eficiencia en cuanto a la generación de electricidad teniendo así mejores resultados en la entrega al SEN.

3-Analizar las implicaciones del proyecto realizando un análisis de ciclo de vida.

Bibliografía

1. ALBA, D. S. 2014. , " Evaluación de alternativas de cogeneración en la UEB Central Carlos Baliño". Universidad Central "Martha Abreu" Las Villas.
2. VEB BERGMANN-BORSIG, 1984. "Grupo generador a contrapresión de 1.5 MW".
3. CATÁLOGO DE GENERADORES ELÉCTRICOS CON TUBINAS DE VAPOR, 2016. <https://www.google.com.cu/spanish.alibaba.com/g/electrical-generator-steam-turbine.html>
4. CITMA octubre, 2001. "Primera Comunicación Nacional de la convención Macro de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático".
5. COMERCIAL, Á. 2016. "Registro de control diario".
6. CENGEL, Y. A. 2009. " Termodinámica".
7. DR.C. ANGEL M. RUBIO GONZÁLEZ. , D. C. M. A. R. R., DR.C. PABLO R. ROQUE DÍAZ. 2014. "ESTUDIO ECONÓMICO Y CONSIDERACIONES TÉCNICAS SOBRE LA CONVENIENCIA DEL EMPLEO DE PRESIÓN DE VAPOR DE 67 ó 100 BAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE BIOELÉCTRICAS EN CUBA".
8. ENERGÉTICO 2014-2016. Registro de electricidad.
9. FAIRES, V. M. 1983. " Termodinámica".
10. GARCÍA, E. , CORREDOR, A. , CALDERÓN, L. GÓMEZ, M. 2013. "Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia."
11. GUTIÉRREZ, E. 2013. "El azúcar cubano adquiere protagonismo energético". Diarios latinoamericanos de Tierramérica.
12. HUGOT, E. 1963. "Manual para ingenieros azucareros".
13. INCROPERA, F. P. 1996 "Fundamentals of heat and mass transfer".
14. KEENNAN, J. , KEYES, F. 1988. "Steam Tables"

15. MORALES, J. 2016. "Premisas fundamentales a tener en cuenta en los Estudios de Factibilidad (EFTE) de las inversiones".
16. NYLUND, L. , PUSKORIUTE, L. 2015. "Cogeneration unit modifications to maximize the electricity generation in Cuban sugar mills"
17. PAREDES, S. F. 2015. "Análisis termodinámicos de los ciclos de Rankine"
18. PÉREZ, I. R. R. 1987. *MEMORIA DESCRIPTIVA CAP60-00-00-00IT*.
19. REIN, P. 2007. *Cane Sugar Engineering*, Berlin.
20. RODRÍGUEZ, R. L. 2010. "Ahorro y administración de la energía. Balance energético de un central azucarero."
21. SALA, D. D. L. 2016. "Evaluación diaria de zafra".
22. SALOMÓN, R. 2016. "Bioeléctricas despiertan creciente interés mundial"
23. SÁNCHEZ, J. T. 2014. "La reconstrucción de la industria azucarera cubana"
24. SOLARES, M. M. 2011. "Indicadores para medir la eficiencia en el proceso de generación de energía de un central azucarero".
25. TECMA. 2004. Algunos conceptos de operación sobre generación de vapor, eficiencia.
26. UNDAY, M. Z. G. 2005. *Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernández"*. Universitat de Girona
27. UEB, C. B. 2014. "Ciclo energético".
28. WWF 1995. Climate Change "World Wide Fund for Nature".