

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial**

**Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías
Ambientales**



TRABAJO DE DIPLOMA

Alternativa para la exportación de electricidad en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez a partir de la instalación de una bioeléctrica.

Autor: Duvier Anoceto Santos

Tutor: Dr. C Oscar M Cruz Fonticiella

Santa Clara 2017

Año 59 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 Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento

Sabemos lo que somos, pero aún no sabemos lo que podemos llegar a ser.

William Shakespeare.

Los grandes espíritus siempre han encontrado violenta oposición de parte de los mediocres. Estos últimos no pueden entender cuando un hombre no sucumbe impensadamente a prejuicios hereditarios, sino que, honestamente y con coraje usa su inteligencia.

Albert Einstein.

“Pero la juventud tiene que crear, una juventud que no crea es una anomalía realmente.”

Ernesto Che Guevara.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mi padre que me ha apoyado en las decisiones que he tomado y junto a mi madre me han guiado.

A mi hermano que siempre ha estado junto a mí y brindándome su apoyo y su consejo.

A mi abuelo Raúl, el cual, a pesar de haberlo perdido, ha estado siempre cuidándome y guiándome.

A mi familia en general, por su apoyo incondicional y por compartir conmigo los buenos y malos momentos.

Agradecimientos

En primera instancia agradezco a mi familia por su ayuda y guía en mi proceso de formación como un profesional.

Agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro y gracias a las ganas de transmitirme sus conocimientos y dedicación que los ha regido, he logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi tesis con éxito y obtener una afable titulación profesional.

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio sobre las potencialidades que tiene la implantación de una bioeléctrica en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez. Para ello es necesario determinar la cantidad de biomasa (bagazo) que pudiera ser recogida tanto en el central Héctor Rodríguez como en su tributario Abel Santamaría, para su posterior utilización con el fin de generar electricidad. Se calculará la energía que se entregará durante el tiempo que estará trabajando. Se usará el *software Cycle-Tempo* para simular el ciclo de la industria durante el período de zafra y el ciclo una vez construida la bioeléctrica, y se determinará el impacto ambiental que trae consigo la generación de electricidad a partir de biomasa. Con la biomasa que se puede acumular durante el período de zafra la bioeléctrica puede funcionar durante 41 días, entregando más de 72 000 MWh/año y se dejan de emitir a la atmósfera más de 64 000 t de CO₂.

Abstract

In this work, a study was carried out on the potentialities of the implementation of a bioelectric plant in the UEB Sugar Central Héctor Rodríguez. For this, it is necessary to determine the amount of biomass (bagasse) that could be collected both at the center of Héctor Rodríguez and in its Abel Santamaría tribute, for its later use in order to generate electricity. Calculate the energy to be delivered during the time will be working. Cycle-Tempo software will be used to simulate the industry cycle during the harvesting and cycle period once the bioelectrical plant is built, and the environmental impact of generating electricity from biomass will be determined. With the biomass that can accumulate during the harvesting period the bioelectric can run for 41 days, delivering a total of more than 72 000 MWh/year and no more than 64 000 t of CO₂ are emitted into the atmosphere.

Índice

Pensamiento.....	2
Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Introducción.....	9
Capítulo 1. Caracterización energética de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.....	12
1.1 Eficiencia energética.	12
1.2 Eficiencia energética en América Latina y el Caribe.....	12
1.3 Barreras que dificultan el desarrollo sistemático de actividades y programas de eficiencia energética en la región de América Latina y el Caribe.	13
1.4 Eficiencia energética en Cuba.	14
1.5 Principales logros alcanzados por la industria azucarera cubana.	15
1.6 Eficiencia del generador de vapor.	16
1.7 Descripción de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.....	17
1.8 La biomasa.....	19
1.8.1 La biomasa como fuente renovable de energía.....	20
1.8.2 Aspectos medioambientales.....	21
1.9 Bioeléctrica.	21
1.9.1 Elementos en una bioeléctrica.	22
1.9.2 La planta de generación de vapor de la bioeléctrica.....	23
1.9.3 Planta de generación eléctrica de la bioeléctrica.....	24
1.9.4 Inversiones necesarias.....	24
1.9.5 Límites de batería del proyecto.....	25
1.9.5.1 Entradas.	25
1.9.5.2 Salidas.	25
1.10 Sistemas de consumo.....	26
1.10.1 Sistema de consumo en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.....	26
1.10.2 Sistema de consumo de vapor para la bioeléctrica.....	27
Conclusiones parciales	29
Capítulo 2. Situación actual de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez y perspectivas para el 2030.	30
2.1 Sobre la producción de caña.	30

2.1.1 Proyección de la producción cañera hasta el 2030.	30
2.1.2 Proyección del rendimiento agrícola por año hasta el 2030.	30
2.1.3 Posibilidades de crecimiento de áreas cañeras.	31
2.1.4 Situación de riego, por ciento abarcado y perspectivas.	32
2.2 Capacidad de molida	32
2.2.1 Capacidad de molida máxima actual.	32
2.2.2 Disposición de caña a moler y caña molida.	33
2.2.3 Tiempo perdido y su comportamiento en los últimos cuatro años.....	33
2.2.4 Rendimiento industrial.	34
2.2.5 Centros de acopio y perspectivas.	35
2.2.6 Caracterización del sistema de recepción de caña (basculador).	35
2.2.7 Caracterización del tándem de molida.	35
2.3 Capacidad de procesamiento.....	37
2.3.1 Descripción los equipos existentes.	37
2.3.2 Consideraciones sobre cuellos de botella en el proceso.	38
2.3.3 Índices históricos de consumo de vapor por tonelada de caña molida.....	39
2.4 Capacidad de generación de vapor y electricidad.	39
2.4.1 Calderas de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.	39
2.4.2 Capacidad de almacenamiento de bagazo y su retroalimentación.	40
2.4.3 Planta eléctrica, turbogeneradores y consumos específicos de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.	41
2.4.4 Entrega histórica de energía al SEN.	41
2.4.5 Índices históricos de generación y consumo de electricidad en el ingenio..	42
2.4.6 Experiencias en el uso de RAC's y cantidades utilizadas por año.....	42
2.5 Limitaciones identificadas.	43
2.6 Estimación del bagazo sobrante en la bioeléctrica durante la zafra.	43
2.7 Estimación del bagazo que queda en la UEB Central Azucarero Abel Santamaría durante la zafra.	45
2.8 Tiempo de funcionamiento de la bioeléctrica fuera de zafra.....	46
2.9 Energía vendida al SEN.	47
2.10 Impacto ambiental.....	48
2.11 Beneficios ambientales de la Bioeléctrica.....	49
Conclusiones parciales	50

Capítulo 3. Uso del Software Cycle-Tempo para la simulación de la planta actual y la bioeléctrica.	51
3.1 Software Cycle-Tempo.	51
3.2 Características del software Cycle-Tempo.	51
3.3 Simulación del esquema actual de la industria azucarera.	52
3.3.1 Cálculo de la eficiencia del ciclo actual de la industria azucarera Héctor Rodríguez.	53
3.4 Simulación del esquema actual de la industria azucarera Abel Santamaría.	54
3.4.1 Calculo de la eficiencia del central Abel Santamaría.	55
3.5 Simulación del esquema de funcionamiento de la bioeléctrica durante la zafra.	55
3.5.1 Cálculo de la eficiencia de la bioeléctrica durante la zafra.	57
3.6 Simulación del esquema de funcionamiento de la bioeléctrica una vez concluida la zafra.	58
3.6.1 Cálculo de la eficiencia de la bioeléctrica fuera de zafra.	58
3.7 Comparación entre las simulaciones.	59
Conclusiones parciales	60
Conclusiones generales.	61
Recomendaciones	62
Bibliografía	63

Introducción

En el poblado de Sitiecito, perteneciente al municipio Sagua la Grande, provincia de Villa Clara, en el centro de Cuba, se encuentra la UEB (Unidad Empresarial de Base) central azucarero "Héctor Rodríguez". Esta UEB está insertada en el marco de la reorganización y mejoramiento del modelo económico cubano de gestión energética y ambiental de los recursos. Hay planes para crear la nueva empresa de azúcar y revitalizar la industria, entre otras cosas, permitiendo el avance de la inversión extranjera y evitando cierre de las fábricas de azúcar. Las empresas azucareras se encuentran en un entorno cambiante, tanto a nivel tecnológico, como de sistemas de gestión. La ventaja principal de la industria azucarera sobre las demás industrias, desde el punto de vista energético, radica en el hecho que se dispone de combustible (bagazo).

La energía ha sido y es una necesidad básica de la sociedad a lo largo de su existencia. El consumo de combustibles fósiles, aparte de su vida limitada, genera graves problemas de contaminación atmosférica, como son la lluvia ácida, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono, debido a la emisión de óxidos de azufre, nitrógeno y dióxido de carbono. Por otro lado, una fuente energética alternativa, la energía nuclear, es altamente contaminante, debido principalmente a los residuos que genera, los cuales permanecen activos durante miles de años. La energía producida a partir de la biomasa, dentro de las renovables, tiene un papel preponderante en muchos países como por ejemplo Brasil. Los residuos que resultan de la actividad agrícola y forestal, constituyen un amplio porcentaje de la biomasa que pudiera utilizarse de manera racional. (Beltrán, 2005, pp 10)

En las últimas décadas, la investigación sobre las energías renovables ha ido creciendo, dentro de estas, la biomasa es una fuente importante de energía disponible en la naturaleza, y ha sido ampliamente estudiada, demostrando que los residuos de biomasa tienen un gran potencial para la generación de energía. El uso de biomasa puede alcanzar hasta el 18 % de la energía primaria del mundo para el año 2050, cuatro veces el valor actual. Dentro de las principales

producciones agrícolas realizadas en el mundo, las que generan mayores cantidades de residuos son la caña de azúcar, el maíz, el trigo, el arroz, la yuca, etc. Además de la producción de azúcar, el procesamiento de la caña acumula residuos como el bagazo y la paja que pueden utilizarse en sistemas de cogeneración en los centrales azucareros.

Los primeros proyectos de cogeneración de esta industria azucarera utilizaron bagazo para producir vapor y satisfacer la demanda de energía térmica del proceso, produciendo vapor saturado o ligeramente sobrecalentado. A fines de la década de 1990, el objetivo de las plantas de azúcar era autoabastecerse en energía térmica y eléctrica, así como, lograr un excedente de electricidad para su venta a la red.

Los sistemas de cogeneración de los ingenios azucareros, en países como Brasil, la India, Sudáfrica y Australia son ciclos que producen vapor sobrecalentado en las calderas que se expande en las turbinas de vapor, generando energía eléctrica y vapor de baja presión, para el proceso industrial. (Alves, 2015, pp 2)

Aunque la sincronización de los turbogeneradores de los centrales azucareros al Sistema Eléctrico Nacional, data aquí desde principios de la década de los 80 del pasado siglo, las plantas bioeléctricas representan una mejora de la tecnología existente y un mayor aprovechamiento de la energía. Estos generadores de nuevo tipo emplearán también como materia prima fundamental el bagazo, fibra de la caña molida para extraerle el jugo, la cual además de abaratar la producción de electricidad reduce la carga contaminante al medio ambiente. Una de las cualidades de esta tecnología es que logra triplicar la presión de las calderas actuales en las fábricas de azúcar y hace mucho más eficiente el ciclo de generación de energía. En la provincia de Villa Clara el programa de producción de energía limpia mediante la biomasa azucarera contempla el emplazamiento de tres bioeléctricas de mediana capacidad, Héctor Rodríguez con 20 MW, Quintín Banderas y George Washington.

Objetivo general

Determinar el tiempo de operación de la bioeléctrica fuera de zafra y la energía que exportará al SEN, a partir de la realización de las simulaciones correspondientes en el *software Cycle-Tempo*, para calcular el combustible sobrante en la bioeléctrica y el central tributario durante la zafra y estimar el impacto ambiental que tendrá la instalación de la bioeléctrica.

Objetivos específicos

1. Determinar el potencial de biomasa con que podrá contar la bioeléctrica para su funcionamiento fuera de zafra.
2. Estimar el impacto medioambiental provocado por la quema del bagazo.
3. Calcular la energía que será vendida al SEN durante el tiempo de funcionamiento.
4. Establecer una comparación entre la tecnología existente en la industria y la que se instalará en la bioeléctrica, utilizando las simulaciones realizadas en el *software Cycle-Tempo*.

Problema científico.

No existe un estudio sobre las potencialidades que tiene la instalación de una bioeléctrica en la UEB central azucarero Héctor Rodríguez, para la exportación de electricidad al SEN.

Hipótesis

Se generará energía eléctrica fuera del período de zafra, utilizando el bagazo acumulado como combustible.

Capítulo 1. Caracterización energética de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.

1.1 Eficiencia energética.

Una de las problemáticas del mundo moderno es, sin lugar a dudas la energía, de ella depende el funcionamiento de las fábricas, la obtención de alimentos y su preparación, la iluminación, climatización de los hogares, el transporte de personas y mercancías, etc.

La gestión energética, se concibe como un esfuerzo organizado y estructurado para conseguir la máxima eficiencia en el suministro, conversión y utilización de la energía, mediante un conjunto de acciones técnico-organizativas, para administrarla eficientemente, que aplicadas de forma continua permitan establecer nuevos hábitos de dirección, control y evaluación de su uso. Estas acciones están dirigidas al aprovechamiento de las oportunidades de conservación de la energía, minimización de su impacto ambiental y reducción de los costos, sin perjuicios del confort, la producción y la calidad de esta. (Cid, 2009, pp 3)

Eficiencia energética, implica el desarrollo de una actividad productiva o de prestación de servicio, con el máximo de resultados socialmente útiles y con el menor gasto de portadores energéticos técnicamente posible y la menor contaminación ambiental por la utilización de estos. La gerencia de la eficiencia energética debe tener como objetivo final el logro de la máxima reducción de los consumos energéticos, con la tecnología productiva actual de la empresa y realizar los cambios a tecnologías eficientes en la medida que estos sean rentables, de acuerdo a las posibilidades financieras de cada empresa. Lograr este objetivo de forma continua requiere organizar un sistema de gestión, cambios de hábitos y cultura energética. (Campos, 2003, pp 14).

1.2 Eficiencia energética en América Latina y el Caribe.

En años anteriores, la baja eficiencia energética, ha afectado a los países de América Latina y el Caribe, debido al bajo nivel de gestión energética empresarial,

los bajos precios de la energía, el deficiente funcionamiento de los mercados energéticos, la falta de financiamiento para proyectos entre otros. (Caballero, 2001)

En la actualidad, se llevan a cabo inversiones en los sectores que más potencialidades tienen para la generación de energías más limpias o renovables, encontrándose, entre estas, las inversiones en bioeléctricas e hidroeléctricas.

La OLADE recomienda, en el documento "Energía renovable, biocombustible y caña de azúcar en Cuba", realizar las siguientes acciones en el sector industrial, para elevar la eficiencia energética. (OLADE, 2009, pp 104)

- Auditorías detalladas.
- Promover la cogeneración.
- Implantación de programas de manejo de la demanda de energía eléctrica.
- Introducción de equipos eficientes.
- Programas de capacitación.
- Actividades de investigación.

1.3 Barreras que dificultan el desarrollo sistemático de actividades y programas de eficiencia energética en la región de América Latina y el Caribe.

En algunos países, el sector encargado de promover y desarrollar la eficiencia energética tiene un perfil muy bajo, esto se debe a la falta de información acerca de qué acciones pueden realizarse, qué beneficio económico se obtendría y qué tecnologías podrían aplicarse para mejorar el uso de la energía, en especial en el sector residencial, comercial, industrial y el de servicios públicos. (CEPAL, 2014, pp 85)

- En algunos países la disponibilidad y penetración de tecnologías superadoras en cuanto a ahorro energético se ve dificultada por una cuestión de precios poco accesibles a la mayoría de la población.
- Continúan siendo insuficientes las regulaciones efectivas para inducir acciones y proyectos de eficiencia energética. Si bien algunos países ya tienen leyes orientadas a la promoción y desarrollo de la EE (eficiencia energética), en algunos casos no están reglamentadas, por lo que no tienen aplicación concreta todavía.
- En algunos países, las tarifas de la energía no representan adecuadamente el costo de ponerla a disposición en el mercado, por la existencia de subsidios; esta situación atenta contra la rentabilidad de los proyectos de EE, aumentando el período de recuperación de las inversiones y poniendo en riesgo su ejecución.
- No está suficientemente desarrollada la implementación masiva de la ISO 50001 para la gestión de la energía, con su consecuente impacto sobre la potencial generación de programas sistemáticos de eficiencia energética (en especial, debido a que es una norma de aplicación voluntaria).
- En las empresas industriales, se debe considerar un cambio de paradigma de consumo y gestionar con eficiencia la energía, para así potenciar el impacto positivo que el uso racional de esta tiene sobre el medio ambiente.
- El uso de combustibles fósiles, como recurso energético en la generación de energía eléctrica, ha provocado, por efecto de las condiciones de mercado, que se presente una tendencia al alza incontrolable de los precios del petróleo, causando un aumento en el precio de la energía eléctrica e incidiendo negativamente en la economía nacional.

1.4 Eficiencia energética en Cuba.

En el período del año 1980 al 1989 en Cuba existía un adecuado balance entre la oferta y la demanda de portadores energéticos, creciendo el consumo de energía producto del desarrollo del país a una tasa promedio anual del 4%.

Del año 1990 al 1993, con el derrumbe del campo socialista, el incremento del bloqueo y la crisis económica que comenzó a sufrir el país, la disponibilidad de la generación eléctrica decreció desde el 78 hasta el 53% y la de combustible, en prácticamente dos años, se redujo al menos del 50%.

El consumo promedio de energía eléctrica en este período en el país decreció en más de un 6% anual. (Cid, 2009, pp 5)

La matriz energética se refiere a una representación cuantitativa de toda la energía disponible, en un determinado territorio, región, país, o continente para ser utilizada en los diversos procesos productivos. Actualmente, se llevan a cabo acciones para aumentar la matriz energética de Cuba, fundamentalmente en materia de energías renovables. La industria azucarera tiene ventajas en este aspecto debido a que la energía que se consume es obtenida a partir de la quema del bagazo de caña, siendo un ciclo de cogeneración que permite satisfacer la demanda de calor y energía eléctrica de la industria y exportar parte de la energía eléctrica que se genera.

Dentro de los portadores energéticos de la industria azucarera, el de mayor incidencia es la energía eléctrica. La energía eléctrica que se produce en la industria azucarera cubana, en lo fundamental, se consume en el propio proceso productivo del azúcar, las que se encuentran muy por debajo de las potencialidades. El uso de nuevas tecnologías como son los variadores de frecuencia para obtener diferentes velocidades de rotación en los motores eléctricos, así, como el cambio de motores eléctricos con un bajo factor de potencia por otros de un mayor factor de potencia permitiría aumentar la eficiencia energética de los centrales azucareros.

1.5 Principales logros alcanzados por la industria azucarera cubana. (OLADE, 2010, pp 108)

- No se consume fuel oil en la producción de azúcar, solo biomasa.
- Proyecto de recolección de RAC's (Residuos Agrícolas Cañeros) en el campo.
- Autoabastecimiento energético (electricidad) del 105 %.

- Molinos de paja de caña en nueve centrales azucareros, reduciendo el consumo de fuel oil a 80 kg/t de azúcar refino producido.
- Utilización de los RAC's en las arrancadas y paradas de los centrales.
- Siembra y cosecha de caña energética con altos contenidos de fibra.
- Determinación, en zafra, de las producciones de derivados de la caña de azúcar.

1.6 Eficiencia del generador de vapor.

Para el cálculo de la eficiencia de los generadores de vapor se usan dos métodos, el método directo y el método indirecto. El método directo consiste en dividir la energía que gana el vapor de agua producido en el generador de vapor, entre la energía teórica que suministra el combustible que se quema (ver ecuación 1.1). El método indirecto consiste restar al total de la energía (100 %) las diferentes pérdidas que se tienen en la caldera (generador de vapor) (ver ecuación 1.2).

Eficiencia por el método directo (Rubio, 2015, pp 18).

$$\eta^d = \frac{D_{vsc}(i_{vsc} - i_{aa})}{B_c Q_{in}^a} \quad (1.1)$$

Donde:

η^d : eficiencia por el método directo.

D_{vsc} : demanda de vapor sobrecalentado kgv/s.

i_{vsc} : entalpia del vapor sobrecalentado kJ/kg.

i_{aa} : entalpia del agua alimentación kJ/kg.

B_c : caudal de combustible kgc/s.

Q_{in}^a : poder calórico inferior del combustible kJ/kg.

Eficiencia por el método indirecto (Rubio, 2015, pp 18).

$$\eta^a = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (1.2)$$

Donde:

η^a : eficiencia por el método analítico.

100: constituye el total de la energía producida en el generador de vapor.

q_2 : Pérdida de calor con los gases de escape, depende proporcionalmente de la humedad del combustible, del exceso de aire, la humedad ambiental y la temperatura de los gases.

q_3 : Se define como la pérdida de calor por combustión incompleta desde el punto de vista químico.

q_4 : Es la pérdida de calor por combustión incompleta, por causas mecánicas como derrames en la alimentación de combustible, combustible extraído junto con las cenizas o arrastrado con los gases.

q_5 : Se refiere a las pérdidas de calor al medio ambiente que rodea la caldera, ya sea por radiación o convección.

q_6 : Es la pérdida de calor extraído de la caldera con escorias líquidas o ceniza.

1.7 Descripción de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Central Azucarero Héctor Rodríguez de Sitiecito, Sagua la Grande, Villa Clara con dirección Calle E No:6 e/ Carretera a Granel y calle C, Sitiecito Sagua la Grande, cuenta con una fuerza laboral de 401 trabajadores distribuidos en las diferentes zonas de trabajo. Esta entidad tiene una capacidad de molienda de 4 600 t/día de caña, pudiendo obtenerse, para un rendimiento de la caña del 10%, 460 t/día de azúcar crudo, 1 380 t/día de bagazo, así como miel, meollo y energía eléctrica. (Santana, 2017)

Esta empresa cuenta con solo un centro de limpieza de la caña en el que se obtienen 55 t/día de paja de caña (RAC) y cuenta con un área de cultivo para la caña de 17 800 ha. (Santana, 2016)

Se cuenta, además, con un tándem de molienda compuesto por un basculador, dos juegos de cuchillas, rompe bultos, desmenuzadora, niveladoras y cinco juegos de

mazas; se tiene siete calentadores de guarapo, dos pre-evaporadores, un cuádruple efecto y siete tachos. También se tienen 14 centrifugas para satisfacer la producción (ver figura 1). En esta empresa azucarera existen dos calderas de 55 tv/h que se remplazarán por una de 120 tv/h para la instalación de la bioeléctrica, así, como dos turbogeneradores de cuatro MWh con turbinas a contra presión que serán sustituidos por un turbogenerador de 20 MWh con una turbina de extracción-condensación.

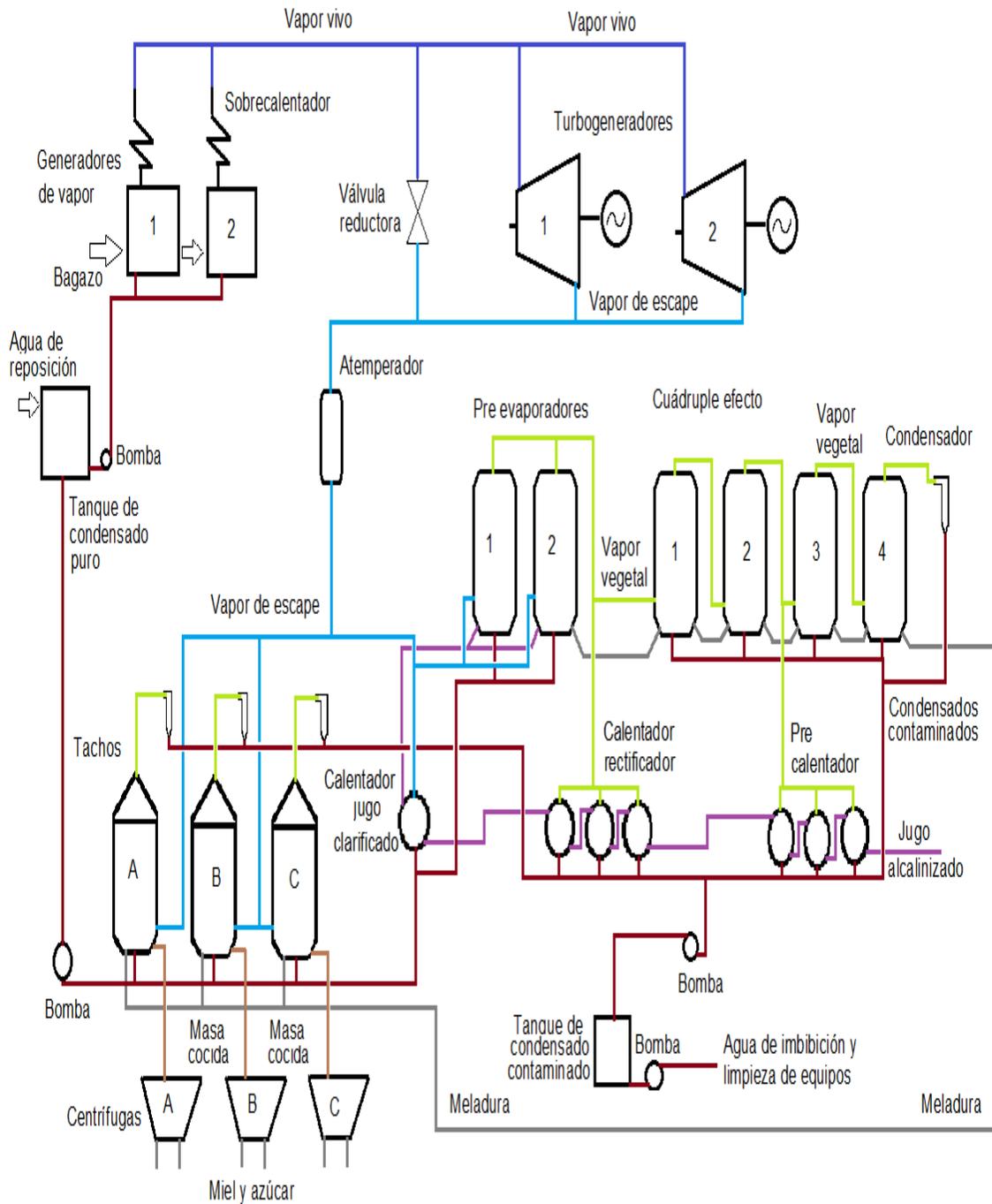


Figura 1. Esquema de funcionamiento de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez. Fuente: elaboración propia, junio del 2017.

1.8 La biomasa.

La biomasa (también conocida como bioenergía o biocombustibles) es la fracción biodegradable de los productos y residuos de la agricultura, la forestación y sus

industrias asociadas. El término también incluye la fracción orgánica de los desperdicios municipales e industriales. Dicha biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede, en última instancia, de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta materia orgánica es renovable cuando se produce a la misma velocidad de consumo, evitando la sobreexplotación de los recursos naturales. (Córdoba, 2011, pp 5)

Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro. (Energía, 2008, pp 12)

1.8.1 La biomasa como fuente renovable de energía.

El cambio climático está muy íntimamente ligado a las pautas de utilización de la energía. La primera forma de reducir el cambio climático es modificar las fuentes de energía que se utilizan y es aquí donde entran las energías renovables, dentro de estas, la biomasa. La biomasa se considera una energía renovable porque para su crecimiento las plantas consumen dióxido de carbono presente en la naturaleza y durante la quema de la misma se libera una cantidad equivalente de dióxido de carbono, lo que significa que no aumenta el dióxido de carbono en la atmósfera. Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural contribuyen de manera significativa al calentamiento del planeta. (Paz, 2013, pp 15)

La biomasa se clasifica de diferentes maneras, siendo las mismas:

Biomasa natural: Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana. Por ejemplo, las podas naturales de los bosques.

Biomasa residual seca: Procede de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales, así como en las industrias agroalimentaria y maderera (ej.: aserrín).

Biomasa residual húmeda: Procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de los residuos ganaderos (por ejemplo, el guano).

Cultivos energéticos: Su única finalidad es producir biomasa transformable en combustible. Incluye los cereales, oleaginosas y remolacha. (Córdoba, 2011, pp 7)

1.8.2 Aspectos medioambientales.

Si, normalmente, a los sistemas de producción de energías renovables se les otorga un beneficio claro: la disminución de la carga contaminante provocada por los combustibles fósiles, en el caso de la biomasa existen otros beneficios como propiciar el desarrollo rural y proporcionar el tratamiento adecuado de residuos o gestionar los residuos procedentes de podas y limpiezas de bosques limitando la propagación de incendios. Otro aspecto a tener en cuenta es la posible reforestación de tierras agrícolas o desforestadas con cultivos energéticos, herbáceos o leñosos, con destino a la producción de biomasa, que aumentarían la retención de agua y la disminución de la degradación y erosión del suelo. Respecto a las aplicaciones energéticas, las calderas modernas de biomasa no producen humos como las antiguas chimeneas de leña, y sus emisiones son comparables a los sistemas modernos de gasóleo y gas. La composición de estas emisiones es básicamente parte del CO₂ captado por la planta, con una baja presencia de compuestos de nitrógeno y con bajas o nulas cantidades de azufre, uno de los grandes problemas de otros combustibles. La mayor ventaja, es que la planta consume, para su crecimiento, la misma cantidad de CO₂ que libera durante la combustión de la biomasa, este CO₂ sólo proviene de la atmósfera en la que vivimos y necesita ser absorbido continuamente por las plantas si se desea mantener en funcionamiento la producción energética con biomasa. (Ourense, 2005, pp 35)

1.9 Bioeléctrica.

Una bioeléctrica, es la base energética de un ingenio azucarero, pero con calderas y turbinas de alta eficiencia y parámetros elevados del vapor, esto permite aumentar notablemente el índice de generación de electricidad por tonelada de

caña molida e incrementar la cantidad de energía eléctrica vendida al sistema eléctrico nacional.

La bioeléctrica recibe del central azucarero la biomasa cañera (bagazo y paja de caña) y la emplea como combustible, genera de vapor y con él electricidad en turbogeneradores, de la cual una parte es entregada al central azucarero y el resto se vende al sistema eléctrico nacional. La bioeléctrica, operará en un sistema de cogeneración en el período de zafra (molida de caña y producción de azúcar) y en un sistema de condensación en el período de inactivo, con el combustible almacenado durante la zafra, esto incrementa los días de operación en el año y reduce el período de recuperación de la inversión. (Rubio, 2017)

Por ser la producción de energía con biomasa una actividad muy valiosa e importante que sustituye en forma notable importaciones de portadores energéticos, se decide estudiar esta inversión, donde se aprovecha el bagazo y la paja (RAC) del propio ingenio, el bagazo que tributan los ingenios de la provincia, así como la biomasa forestal tributada por la Empresa Forestal del MINAGRI.

La bioeléctrica está constituida en su gran parte por la planta de generación de vapor y la planta eléctrica con todos sus sistemas auxiliares que sustituyen la base energética del central azucarero por una más eficiente. (Consuegra, 2015, pp 2)

1.9.1 Elementos en una bioeléctrica.

En una planta de cogeneración existen elementos que son comunes ya que son imprescindibles. (Ourense, 2005, pp 36)

1. Lo más importante de todo es la fuente primaria de la cual se obtiene la energía. En este caso, proviene de la biomasa cañera, compuesta por el bagazo y los RAC's (Residuos Agrícolas Cañeros).
2. Otro elemento muy importante es el motor o turbina de vapor, es el encargado de convertir la energía térmica o química en la energía mecánica, dependiendo del tipo de planta que se va a instalar y el uso que se le va a dar.

3. Una bioeléctrica necesita un sistema de aprovechamiento de la energía mecánica. Normalmente suele ser un alternador que transforma la energía en eléctrica, pero también hay casos en los que el sistema de aprovechamiento es un compresor o una bomba donde la energía mecánica se aprovecha directamente.
4. También, se necesita un sistema de aprovechamiento del calor que se genera, se pueden encontrar con calderas que se encargan de recuperar el calor de los gases de escape, también pueden ser secaderos o intercambiadores de calor o como es el caso de estudio del proceso de obtención del azúcar.
5. El aprovechamiento del calor generado requiere un sistema de tratamiento de las aguas.
6. Hace falta un sistema de control que se encargue de las instalaciones.
7. En la bioeléctrica no puede faltar un sistema eléctrico, que permita la alimentación de los equipos auxiliares de la planta, esto es, la exportación o importación de energía eléctrica que es necesaria. Esto permite poder alimentar a la planta en situaciones de deficiencia eléctrica de la red externa. De esta forma estará disponible inmediatamente en el momento en el que se restablezcan las condiciones del servicio.

1.9.2 La planta de generación de vapor de la bioeléctrica.

Está conformada por una caldera de 120 t/h de vapor y 6.57 MPa, con todo el equipamiento auxiliar correspondiente, que es la encargada del suministro de vapor directo sobrecalentado para satisfacer la demanda de la planta eléctrica. La temperatura del agua de alimentación es de 150 °C a la salida del sistema economizador. La caldera utiliza bagazo, RAC y biomasa forestal como combustibles principales, circulación natural de un solo domo, pantalla de enfriamiento de agua del tipo de membrana, con parrilla fija, ventilación equilibrada y estructura de acero. (Reyes, 2017)

Para lograr una alimentación segura y estable de combustible, se proyecta un área para recepcionar, manipular y almacenar los volúmenes de bagazo, residuos agrícolas cañeros y biomasa forestal (en caso de tenerse). Se garantiza la

operación continua con dos posibilidades de alimentación: desde un almacén techado y otra desde el almacén de mezclado. Se establece un sistema de transportadores de bandas que permite la opción con combinaciones para retroalimentar desde diferentes partes y evitar paradas. Todos los transportadores son de bandas y con tapacetes para evitar contaminación ambiental. (Reyes, 2017)

1.9.3 Planta de generación eléctrica de la bioeléctrica.

Está conformada por un turbogenerador de 20 MW y una turbina de extracción-condensación, con todo el equipamiento auxiliar correspondiente, donde se genera la energía eléctrica suficiente para satisfacer la demanda de los procesos tecnológicos, en el central azucarero y la bioeléctrica, entregando el excedente al sistema electroenergético nacional. El voltaje de salida del generador es de 13.8 kV a una frecuencia de 60 Hz, el mismo está equipado con un enrollado de cuatro polos y gira a $1\ 800\ \text{min}^{-1}$. El generador tiene un factor de potencia de 0.8. La turbina demanda, para su funcionamiento, vapor de alta presión (vapor directo) a $67\ \text{kg/cm}^2$ (6.57 MPa) abs y $520\ ^\circ\text{C}$. (Reyes. 2017)

La turbina de extracción-condensación permite la extracción del flujo de vapor necesario para los procesos de obtención del azúcar durante la zafra, las extracciones para el deareador y el regenerador y el resto del vapor es enviado a un condensador. Una vez concluida la zafra el sistema envía todo el vapor de escape de la turbina hacia el sistema de condensación. (Reyes. 2017)

1.9.4 Inversiones necesarias.

- Montaje de una caldera de 120 t/h con una presión de 6.57 MPa y una temperatura de $520\ ^\circ\text{C}$.
- Montaje de un turbogenerador de 20 MW, 13.8 kV, 60 Hz, con los paneles de mando, control y distribución, sistema de enfriamiento.
- Montaje del sistema de almacenamiento y transportación de la biomasa.
- Montaje de plantas de tratamiento químico y térmico del agua.

- Montaje de sistemas auxiliares de protección contra incendio, contra descargas atmosféricas y aterramiento.
- Alumbrado interior y exterior, canalizaciones para fuerza y control.
- Automatización de todo el sistema. (Reyes, 2017) (Consuegra, 2015, pp 5)

1.9.5 Límites de batería del proyecto.

1.9.5.1 Entradas.

El agua cruda del canal, siendo esta la fuente de abasto de agua para la bioeléctrica.

Los condensados del central azucarero, (solo en tiempo de zafra).

El bagazo desde la planta moledora: 43.4 tb/h, con 50% de humedad (Solo en tiempo de zafra).

La biomasa cañera desde el central Abel Santamaría.

La biomasa forestal desde la Empresa Forestal del territorio (la cual no está definida).

1.9.5.2 Salidas.

Se le entregará al central azucarero 92 t/h de vapor de baja presión, sólo en tiempo de zafra.

Energía eléctrica a la fábrica de azúcar mediante un transformador de 13,8 a 6,3 kV de 6 300 KVA.

La electricidad vendida la Red Nacional desde la Subestación de Enlace a una tensión de 110 kV.

El proyecto dispondrá de los residuales (cenizas) hacia la tolva, estos serán de forma húmeda, y se trasladarán al destino final por transporte automotor.

1.10 Sistemas de consumo.

1.10.1 Sistema de consumo en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.

Las industrias que utilizan grandes cantidades de calor para sus procesos también consumen una gran cantidad de energía eléctrica. Por consiguiente, desde el punto de vista de la ingeniería, es más económico, utilizar el potencial de trabajo ya existente para producir energía en vez de permitir que se desperdicie. El resultado es una industria azucarera que produce electricidad mientras cubre los requerimientos de calor de ciertos procesos industriales (ver figura 2). Una central de este tipo es llamada planta de cogeneración.

El bagazo generado, en el proceso de extracción de la sacarosa, es enviado a la planta de cogeneración para producir el vapor, que se emplea en las turbinas de contrapresión. El vapor de contrapresión, sirve para satisfacer los requisitos térmicos del proceso y su condensado se devuelve a la caldera. Normalmente, la energía eléctrica producida es para uso interno, pudiendo exportarse una parte de la misma al SEN. Las calderas a base de bagazo producen vapor sobrecalentado, para las turbinas de contrapresión, a su vez, el vapor de escape de las turbinas (2.1 bar) se utiliza para satisfacer los requisitos térmicos del proceso. Sin embargo, algunos ingenios emplean vapor con parámetros más altos (de 42 a 67 bar), y generan un exceso de electricidad que se vende a la red nacional. (Oliveira, 2010, pp 6)

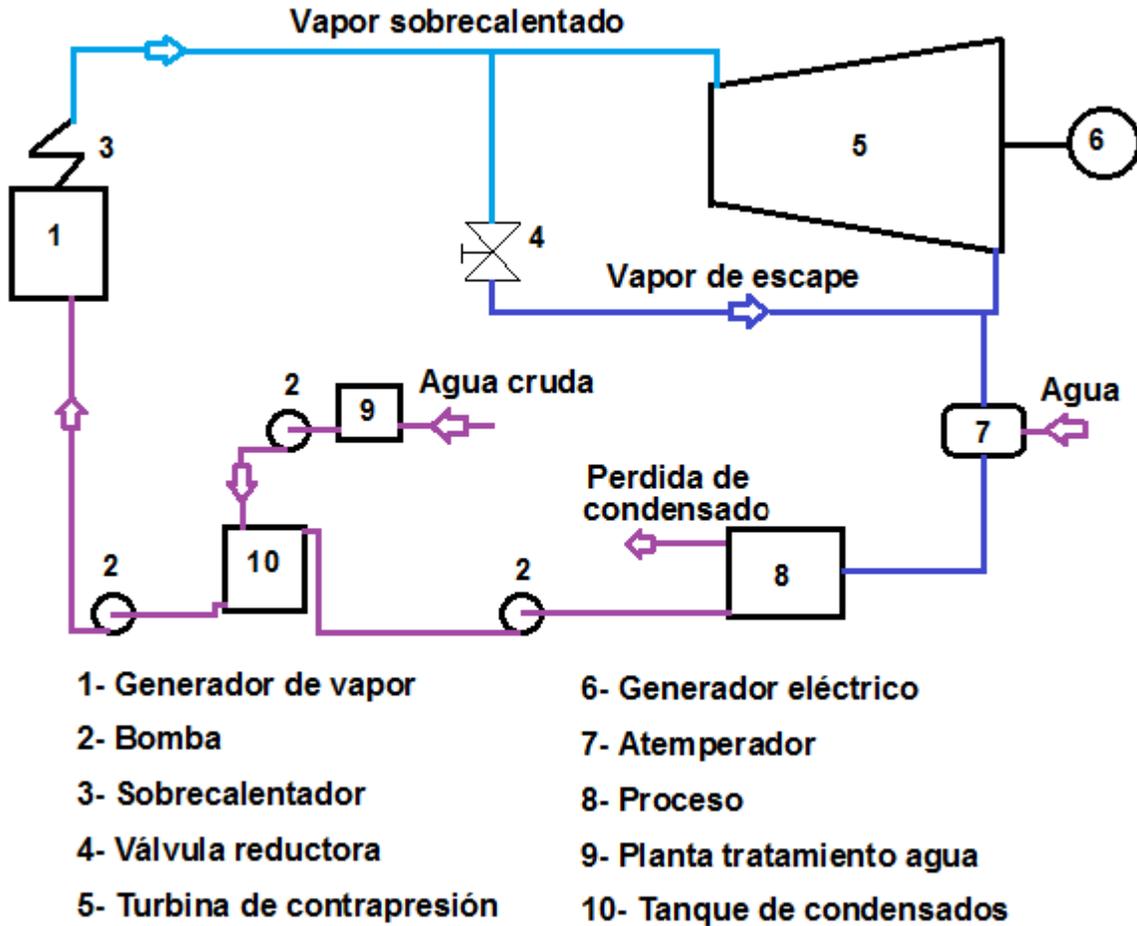


Figura 2. Esquema de funcionamiento actual de la industria azucarera Héctor Rodríguez. Fuente: elaboración propia, febrero 2017.

1.10.2 Sistema de consumo de vapor para la bioeléctrica.

La bioeléctrica funcionará con una turbina de extracción-condensación, a la cual se le realizan tres extracciones de vapor para diferentes funciones. La primera extracción abastecerá un regenerador en el cual se eleva la temperatura del agua de reingreso a la caldera hasta 150 °C, la segunda extracción va a la demanda del proceso y al deaerador y la tercera extracción se envía al condensador (ver figura 3).

Cuando no hay demanda de calor para proceso, todo el vapor pasa a través de la turbina y el condensador, y la planta se opera como una central ordinaria eléctrica de vapor. Bajo condiciones óptimas, una planta de cogeneración simula a una

planta de cogeneración ideal, es decir, todo el vapor se expande en la turbina hasta la presión de extracción y continúa hacia el proceso para calentar los jugos. La planta se debe diseñar de tal manera que las condiciones de operación se aproximen a las óptimas la mayor parte del tiempo. (Cengel, 2012, pp 558)

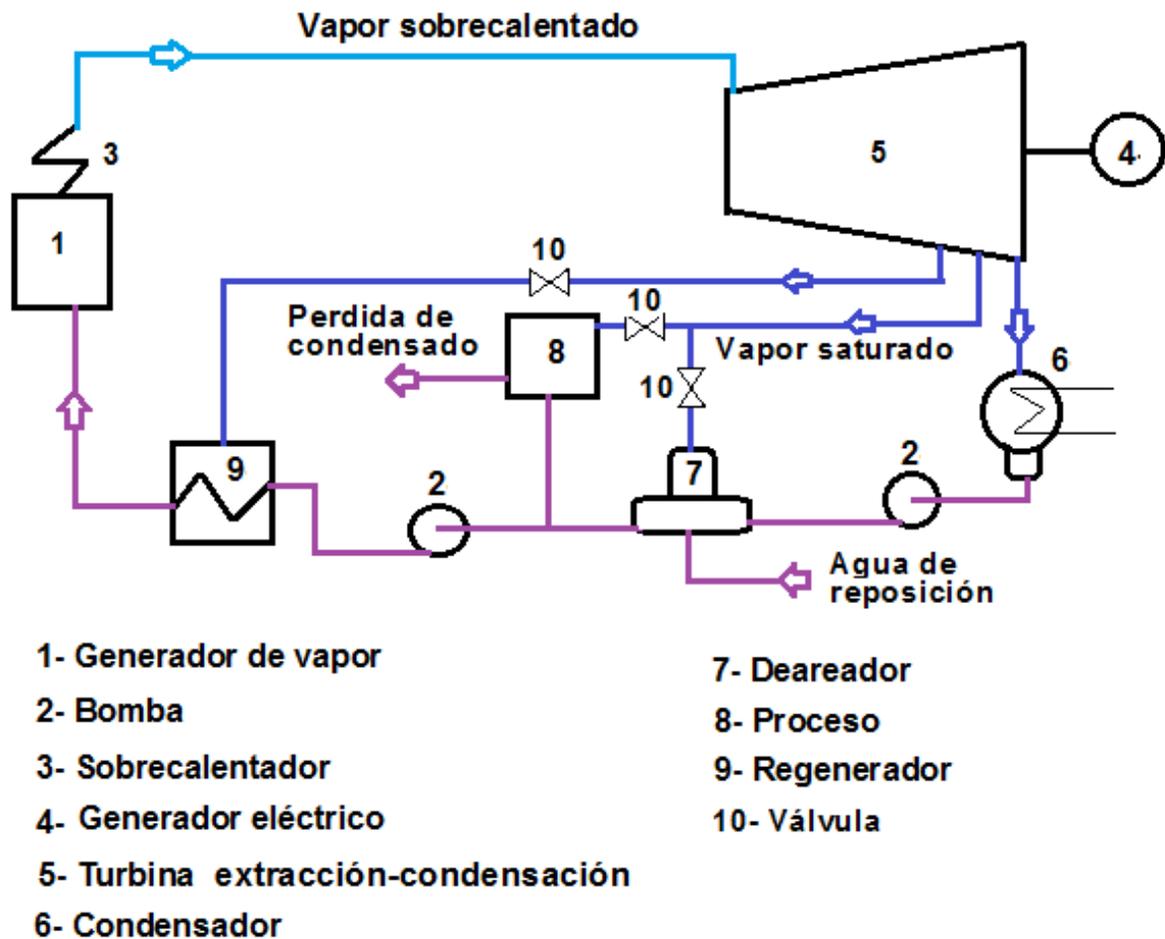


Figura 3. Sistema de consumo de vapor en la bioeléctrica. (Reyes. 2017)

Conclusiones parciales

1. El uso de bagazo, para la producción de energía eléctrica, permitirá una disminución de los gases de efecto invernadero, ya que el CO₂ emitido a partir de la quema de la biomasa es absorbido parcialmente por la caña para su ciclo de vida.
2. La instalación de nuevos equipos, así, como la inversión que se realizará permite la creación de nuevos centros de empleo.
3. La bioeléctrica entregará al central la energía eléctrica y el vapor de bajos parámetros que necesita el mismo para mantener estable la producción, mientras que el central azucarero, enviará el bagazo necesario para el funcionamiento de la bioeléctrica.
4. Se sustituirá una cantidad de crudo nacional o importado para la producción de energía.

Capítulo 2. Situación actual de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez y perspectivas para el 2030.

2.1 Sobre la producción de caña.

2.1.1 Proyección de la producción cañera hasta el 2030.

La producción cañera tendrá un aumento desde una producción actual de 402 505 t hasta 586 500 t para el año 2030 (ver gráfico 1). Para lograr este aumento será necesario elevar los rendimientos agrícolas (tc/ha). (AZCUBA, 2017)

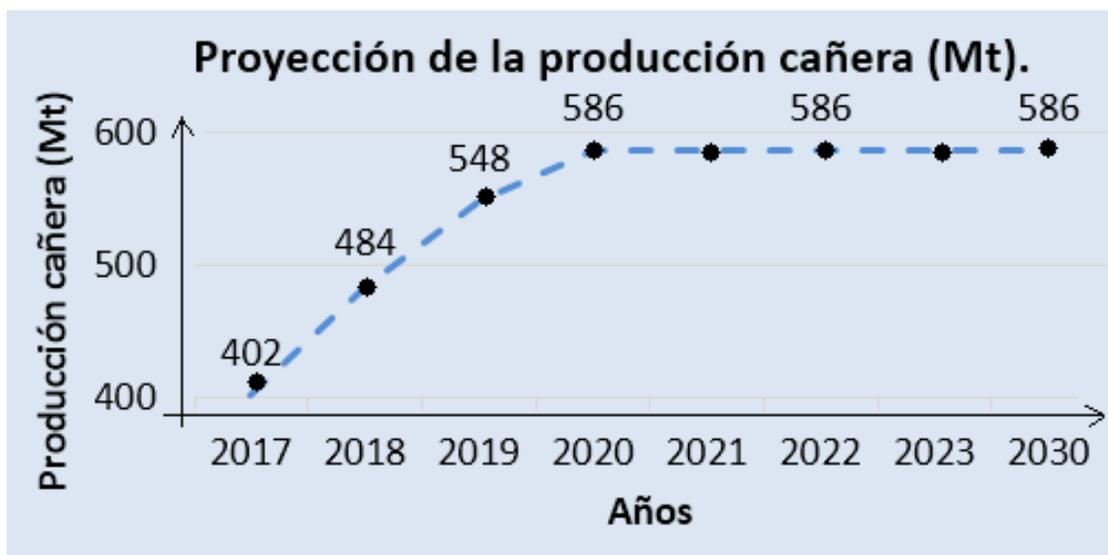


Gráfico 1. Proyección de la producción cañera. (AZCUBA, 2017)

2.1.2 Proyección del rendimiento agrícola por año hasta el 2030.

El rendimiento agrícola es la relación de la producción total de un cierto cultivo cosechado por hectárea de terreno utilizada. Se mide usualmente en toneladas métricas por hectárea (t/ha). El rendimiento es la producción obtenida por unidad de superficie, los dos componentes básicos que van a estructurarlos son:

- La cantidad de caña existente en esa unidad de superficie (densidad de población).
- Producción particular de cada región.

Actualmente, el rendimiento agrícola está sobre las 39,6 tc/ha, siendo un valor aceptado por la industria azucarera, pero que no es el mejor rendimiento que se puede tener. El rendimiento agrícola se ve en aumento debido a las nuevas técnicas de cultivo y las variedades de semillas de caña que son plantadas (ver gráfico 2). Se prevé que para el año 2030 el rendimiento sea de 55,47 tc/ha. Para cumplir esta meta es necesario un aumento paulatino del rendimiento agrícola por año. (AZCUBA, 2017)

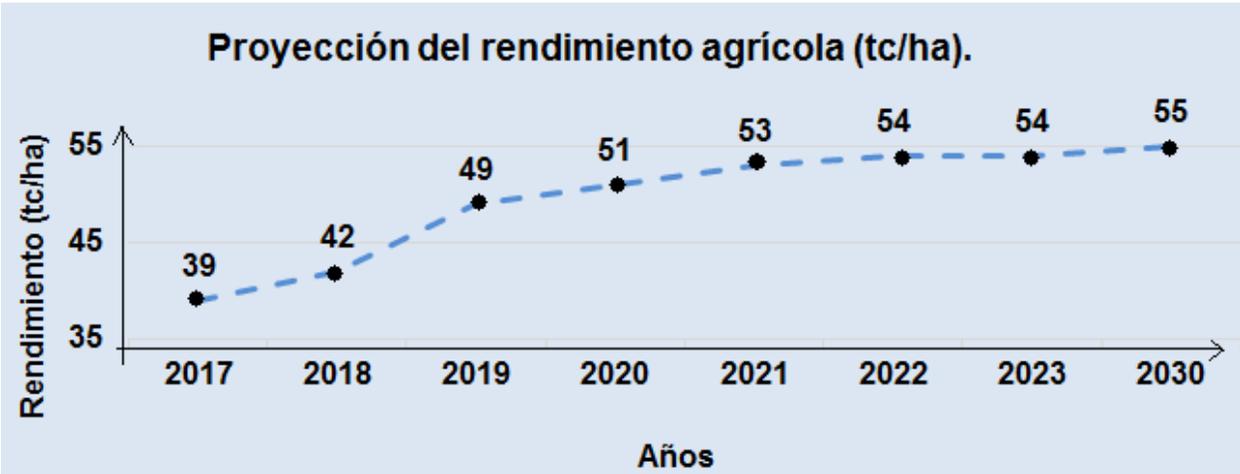


Gráfico 2. Proyección del rendimiento agrícola. (AZCUBA, 2017)

2.1.3 Posibilidades de crecimiento de áreas cañeras.

La industria cuenta con un área destinada a la producción cañera de 17 887 ha, las cuales se verán afectadas para el 2030 debido a que se le entregarán tierras de cultivo al central Carlos Baliño, quedándose para esta fecha con 14 860 ha, (ver gráfico 3). (AZCUBA, 2017)

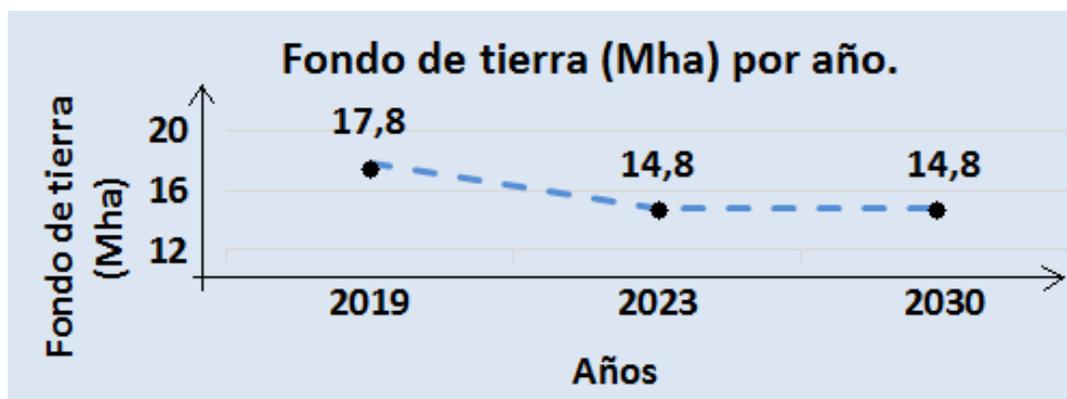


Gráfico 3. Situación de las áreas cañeras para el 2030. (AZCUBA, 2017)

2.1.4 Situación de riego, porciento abarcado y perspectivas.

Las tierras dedicadas al cultivo de caña cuentan con canales magistrales y canales distribuidores por los que fluye el agua para la irrigación de los cultivos, permitiendo el riego en los períodos de seca en los que no se cultiva la caña. Del total de tierras dedicadas a la caña solo se pueden regar 10 493 ha, representando el 58,6% de las tierras. Para el año 2030, debido a la disminución de las tierras dedicadas al cultivo de caña, el área que puede ser regada representará el 70,6 %, (ver Tabla 1 Anexos). (AZCUBA, 2017)

2.2 Capacidad de molida

2.2.1 Capacidad de molida máxima actual.

La UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez cuenta con un tándem de molida, el cual está compuesto por dos molinos y cinco juegos de mazas para extraer la sacarosa de la caña, así como niveladoras y rompe bultos, esto posibilita que el ingenio cuente con capacidad para moler 4 600 t/día de caña, siendo esta su máxima capacidad. (Cervantes, 2017)

La práctica demuestra que la industria es capaz de mantener un ritmo constante de molida de 3 910 tc/d, siendo esta su norma potencial de molida. (AZCUBA, 2017)

2.2.2 Disposición de caña a moler y caña molida.

La disposición de caña a moler, está determinada por los rendimientos agrícolas estimados y las hectáreas de caña que se ponen a disposición de la industria azucarera para el período de zafra. Esta norma define, en buena medida, la cantidad de toneladas de caña de que dispone el central azucarero para procesar durante el período de zafra y constituye un valor límite de caña a procesar en la industria. Para el caso de Héctor Rodríguez esta norma tiene un comportamiento bastante lineal, oscilando entre 650 000 t y 700 000 t de caña (ver gráfico 4). Generalmente esta norma se cumple en el orden del 75 - 78%. (Cervantes, 2017)

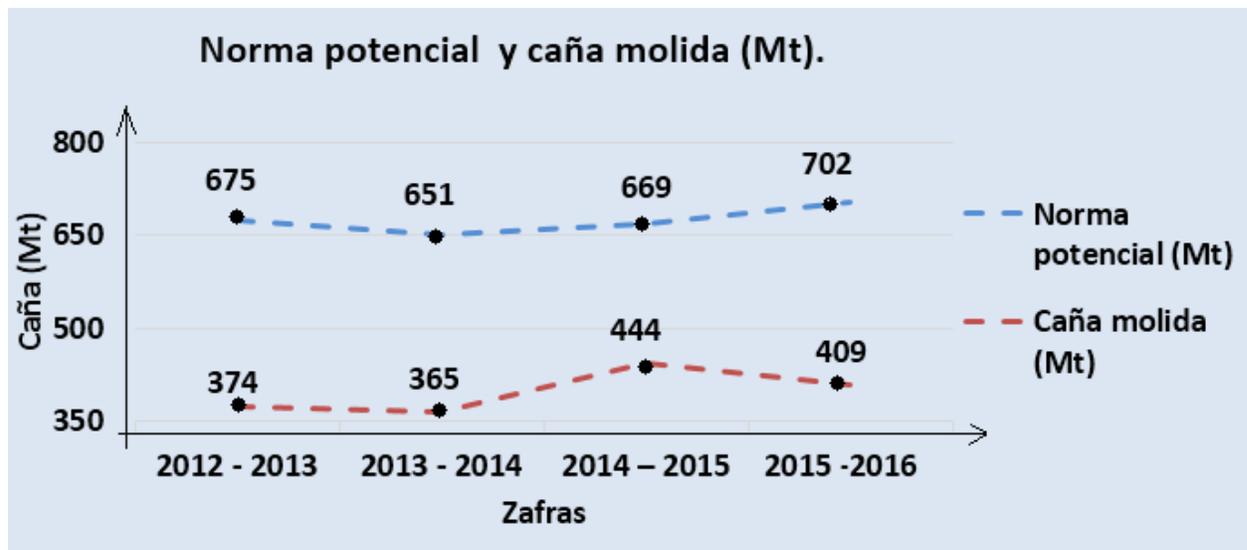


Gráfico 4. Norma potencial y caña molida en las últimas cuatro zafras. (Cervantes, 2017)

2.2.3 Tiempo perdido y su comportamiento en los últimos cuatro años.

El tiempo perdido, durante el período de zafra, es la suma del tiempo usado para los mantenimientos programados y limpiezas, paradas debido a las lluvias que impiden la cosecha de la caña, tiempo perdido por roturas en la industria como pueden ser en tachos, evaporadores, tándem de molida y basculador; paradas por falta de caña, roturas de las vías del ferrocarril (descarrilamientos), etc. Para cada zafra se conoce el tiempo mínimo de parada, ya que este corresponde al necesario para la realización de los mantenimientos programados (15 % de los

días de zafra), así como de las limpiezas de equipos (ver gráfico 5). (Caraballo, 2017)

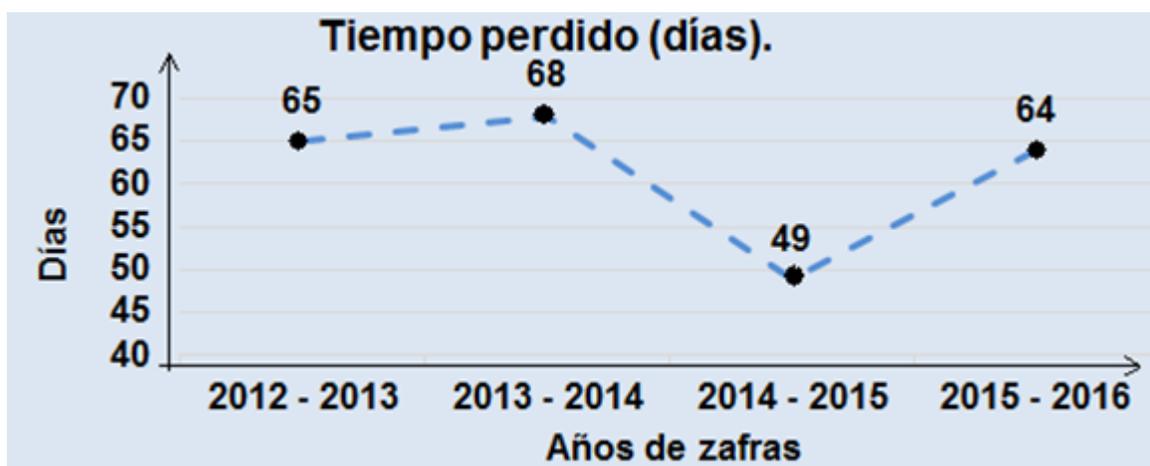


Gráfico 5. Comportamiento del tiempo perdido. (Caraballo, 2017)

2.2.4 Rendimiento industrial.

El rendimiento industrial está determinado por la producción de azúcar que se obtiene en la entidad al moler una determinada cantidad de caña. Para la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez el rendimiento industrial es de aproximadamente 10 %. En el gráfico se muestran los rendimientos industriales de las últimas cuatro zafras, (ver gráfico 6).

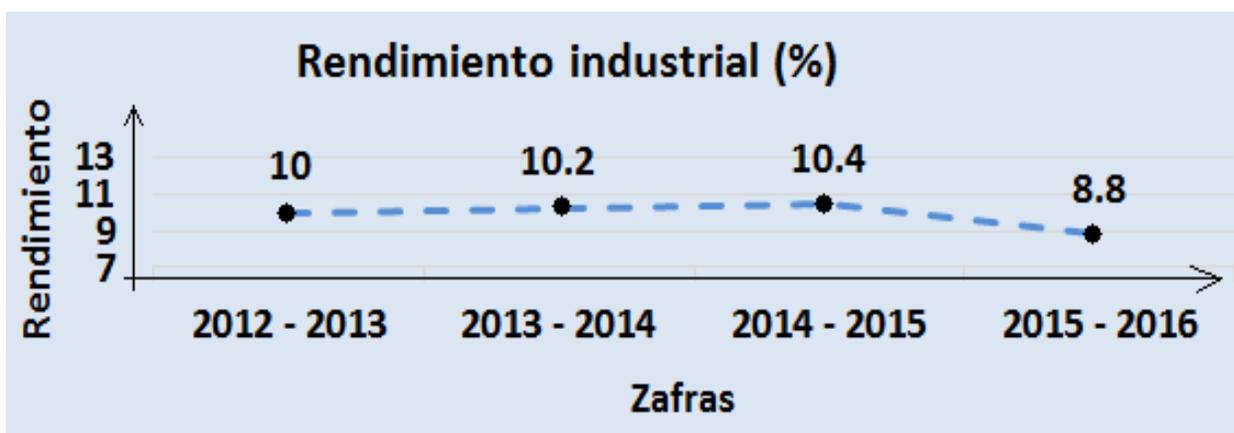


Gráfico 6. Rendimiento industrial (%). (García, 2017)

2.2.5 Centros de acopio y perspectivas.

Esta empresa cuenta con solo un centro de acopio de la caña en el que se obtienen 55 t/día de paja de caña (RAC). (Santana, 2016)(AZCUBA, 2017)

Este centro de limpieza de la caña se encuentra ubicado a 3 km del central, lo que facilita el traslado de la caña por ferrocarriles hasta el basculador.

2.2.6 Caracterización del sistema de recepción de caña (basculador).

El basculador o sistema de recepción de caña, cuenta con cuatro sistemas de volteo, dos para carros de ferrocarril y dos para camiones y sus respectivos remolques. Los sistemas para el volteo del carro de ferrocarril cuentan con un cilindro hidráulico accionado por una bomba de agua que pueden voltear cargas de hasta 42 000 kg (ver Tabla 2 Anexos). En el caso del basculador de camiones se tienen dos pistones accionados por una bomba de aceite que pueden inclinar la carga hasta 75° (ver Tabla 3 Anexos). (Cervantes, 2017)

El sistema, cuenta además, con una primera estera principal en la que se deposita la caña y es conducida a la estera número dos, una segunda estera que eleva la caña hasta la desfibradora, un nivelador de caña para mantener un nivel del colchón a la entrada de las cuchillas, un rompe bultos para eliminar los bultos de caña y mantener una masa homogénea; dos molinos, uno de machetes tipo Backer para picar la caña y otro de martillos, así como una desfibradora ligera adaptada para mejorar la preparación de la materia prima a la entrada del tándem de molida. (Cervantes, 2017)

2.2.7 Caracterización del tándem de molida.

El tándem de molida está compuesto por cinco molinos (ver tabla 4) (ver figura 4) tipo A pertenecientes a un tándem único, de fabricante Fulton (ver figura 5.), cada molino tiene tres mazas y un bolillo alimentador o cuarta maza, que se mueven a partir de la potencia entregada por un motor eléctrico, el molino #1 se mueve por

la acción del motor #1, los molinos 2 y 3 se mueven por la acción del motor 2 y los molinos 4 y 5 son movidos por el motor #3. (Santana, 2017)

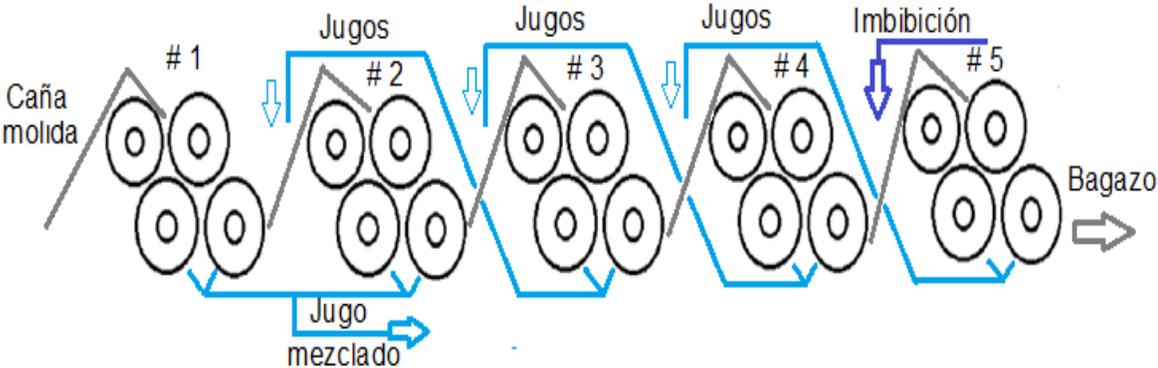


Figura 4. Tándem de molida. Fuente: elaboración propia, junio de 2017.

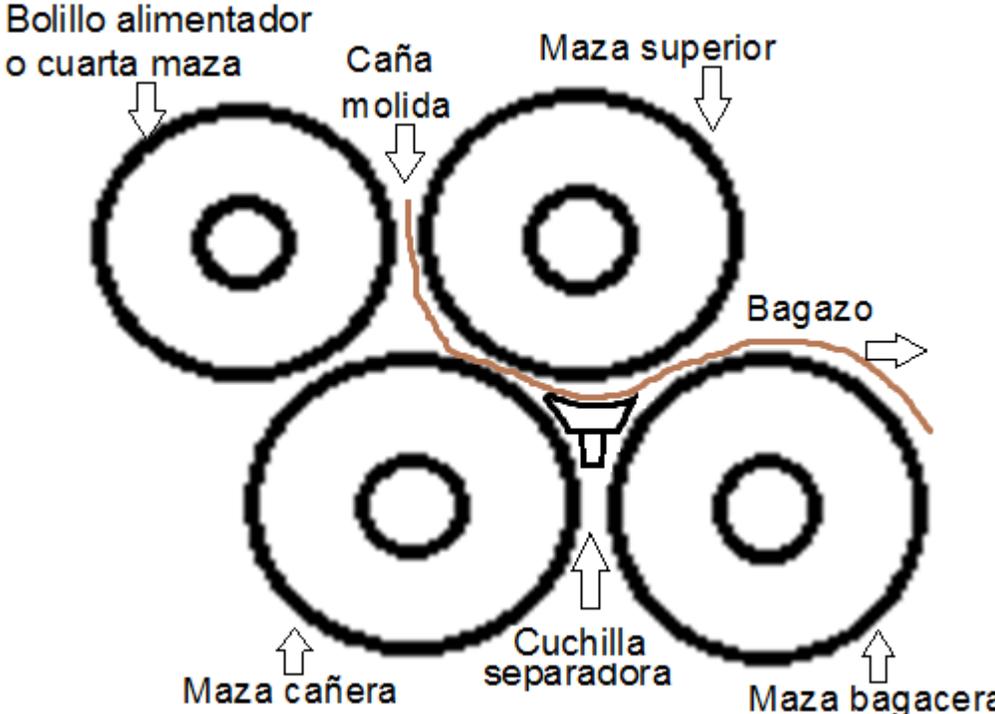


Figura 5. Esquema de las mazas del tándem de molida. Fuente: elaboración propia, junio de 2017.

2.3 Capacidad de procesamiento.

2.3.1 Descripción los equipos existentes.

La industria cuenta con siete calentadores de jugo (ver Tabla 5 Anexos), tres calentadores primarios que funcionan con el vapor que se genera en el segundo vaso del cuádruple efecto, tres calentadores rectificadores que funcionan con el vapor producido en los dos vasos pre evaporadores y un calentador de jugo clarificado que funciona con vapor de la línea de escape de los turbogeneradores. De los calentadores primarios y los rectificadores sólo se mantienen funcionando cuatro ya que los otros dos (uno de cada tipo) están en limpieza. (Socarrás, 2017)

La UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez cuenta con seis evaporadores, dos de ellos constituyen los pre-evaporadores y los otros cuatro constituyen el cuádruple efecto (ver figura 6), (ver Tabla 6 Anexos). Los evaporadores son equipos de concentración del jugo hasta la obtención de la meladura, su consumo depende de la eficiencia térmica, del número de efectos y del uso o no de extracciones del vapor secundario de diferentes efectos. (Socarrás, 2017)

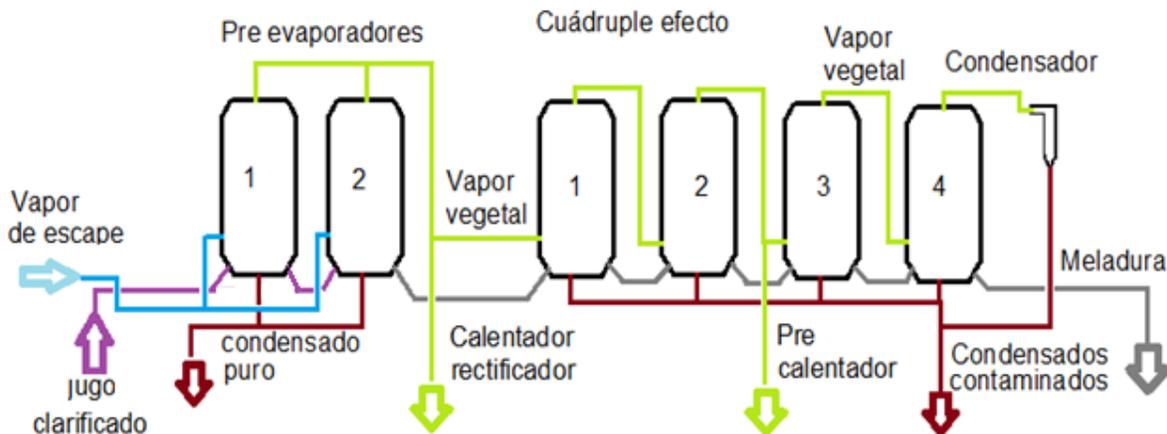


Figura 6. Estación de pre-evaporadores y cuádruple efecto. Fuente elaboración propia, junio de 2017.

La entidad tiene siete tachos, que funcionan de manera independiente usando el vapor de la línea de escape de los turbogeneradores para producir MCA, MCB y MCC (ver figura 7). Cada tacho tiene un condensador para condensar el vapor de agua producido en el mismo y funcionan con un vacío de 25 "Hg (84,7 kPa) (ver

Tabla 7 Anexos). El principio de estos equipos, es análogo a uno de los cuerpos de un evaporador, con la particularidad de que se cristaliza la mayor parte de la sacarosa contenida en la meladura y mieles en operaciones a simple efecto. En estos equipos, al inicio de cada templa, el consumo de vapor es mayor y a medida que va pasando el tiempo éste va disminuyendo. (Socarrás, 2017)

MCA (masa cocida A) MCB (Masa cocida B) MCC (masa cocida C)

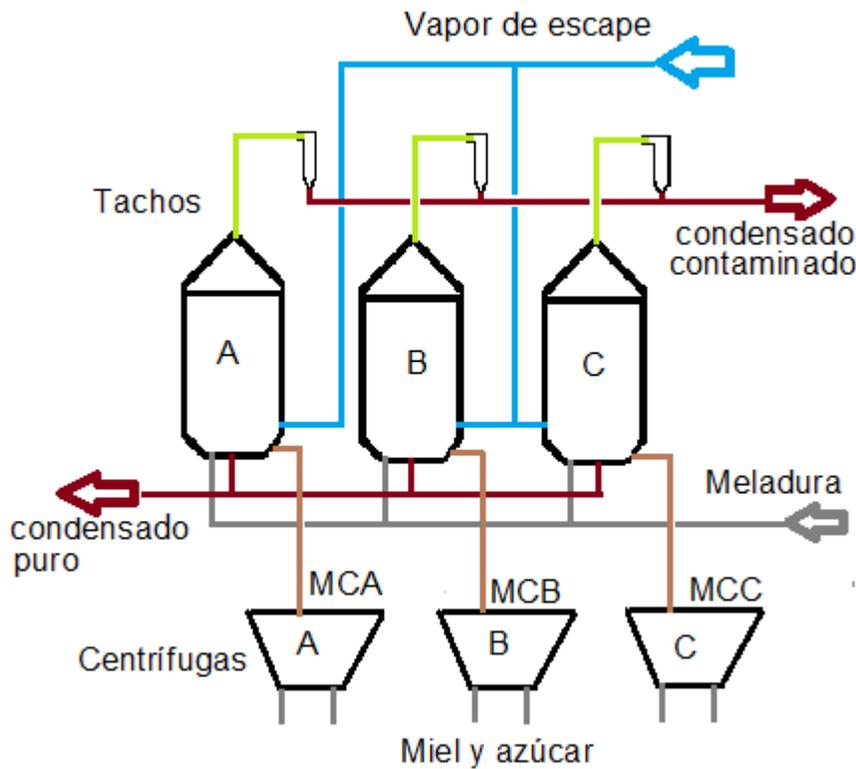


Figura 7. Esquema de los tachos. Fuente: elaboración propia, junio de 2017

2.3.2 Consideraciones sobre cuellos de botella en el proceso.

Esta industria azucarera cuenta un sistema de acomodo de carga para mantener una producción constante de azúcar, miel y la entrega energía eléctrica. (Socarrás, 2017)

Los posibles cuellos de botella se encuentran ubicados en el área de los cristalizadores MCC, de los cuales una parte se encuentra fuera de servicio y a

máxima capacidad de molienda no satisfacen las necesidades. Otro caso es el de las centrifugas de 1^{ra} (azúcar comercial), de las cinco existentes solo cuatro están funcionando, esto puede provocar atrasos en la producción, así como una sobreexplotación de las centrifugas activas. (Socarrás, 2017)

Además, la capacidad de almacenamiento del bagazo sobrante, la cual se ve limitada por la capacidad con que cuenta la casa de bagazo, que es de 1 200 t.

2.3.3 Índices históricos de consumo de vapor por tonelada de caña molida.

Actualmente, la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez consume el vapor de escape de los dos turbogeneradores, en los casos en que el vapor de escape de los turbogeneradores no satisface la demanda del proceso se extrae vapor por la válvula reductora. Los equipos consumidores de vapor de escape son los pre- evaporadores, el calentador de jugo clarificado y los tachos. Los turbogeneradores consumen, cada uno, 42 t/h de vapor de altos parámetros y al funcionar acoplados a turbinas de contrapresión expulsan 42 t/h de vapor de bajos parámetros para un total de 84 t/h de vapor (ver Tabla 8), además se mantiene una extracción de 8 t/h por la válvula reductora ($\approx 9\%$), para un total de 92 t/h, siendo este el consumo de vapor de escape del proceso. Si se mantiene su norma potencial de molienda (4 600 tc/día o 192 tc/h) y se divide el consumo de vapor (92 t/h) por la caña molida (192 tc/h), el índice de consumo obtenido es de 480 kgv/tc. (Socarrás, 2017)

2.4 Capacidad de generación de vapor y electricidad.

2.4.1 Calderas de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.

Los generadores de vapor existentes en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez, son de tubos de agua o acuotubulares, estacionarios de mediana capacidad (55 t/h). Tienen tubos curvos con circulación natural del agua por ellos. Los mismos son generadores de vapor a partir de la quema del bagazo, de tiro mecánico hogar balanceado. (González, 2015)

Las calderas usadas en la generación de vapor son de marca RETAL modificada de tubos curvos con cuatro domos de disposición longitudinal, alimentadas por el bagazo producido al moler la caña de azúcar; estas calderas entregan un flujo de vapor a la industria de 55 t/h o 15,28 kg/s, a una presión de 1 724 kPa abs (17,24 bar) y la temperatura del vapor es de 400 °C. También, se cuenta con una caldera de respaldo de 25 t/h de vapor a una presión de 1 724 kPa abs (17,24 bar) y la temperatura del vapor es de 350 °C como se muestra en las tablas, (ver Tablas 9 y 10 Anexos). (Cervantes, 2017)

2.4.2 Capacidad de almacenamiento de bagazo y su retroalimentación.

Existen diversas formas para mejorar la eficiencia y ahorrar combustible en la industria azucarera que se pueden resumir a continuación:

- Estudios del sistema actual para la introducción de mejoras que determinen una mayor eficiencia del sistema energético.
- Cambios del sistema buscando una mayor utilización del calor y vapor con vistas a la optimización.
- Sustitución de equipos de baja eficiencia térmica por otros de mayor eficiencia.

Existen estudios desarrollados por diferentes autores sobre la potencialidad de la industria azucarera, como productor de energía, tanto en forma de calor como de electricidad, que incluso pueden ser vendidas o puestas a disposición de las redes de distribución en diferentes países. (Rodríguez, 2015)

La casa de bagazo cuenta con una capacidad de almacenamiento de 1 200 t de bagazo, de las cuales 200 t son de reserva y 1 000 t de exportación hacia otras entidades. Se cuenta, además, con transportadores de tablillas para enviar el bagazo desde su lugar de almacenamiento hasta las calderas y garantizar su funcionamiento en caso de roturas en el tándem de molido o en los transportadores principales. (Cervantes, 2017)

2.4.3 Planta eléctrica, turbogeneradores y consumos específicos de la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez.

La UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez cuenta con dos turbogeneradores procedentes de la antigua URSS que están equipados con turbinas a contra presión, cada uno con una potencia de generación de 4 MW para un total de 8 MW, el flujo de vapor requerido por los turbogeneradores es de 42 t/h o 11,67 kg/s cada uno. La presión de vapor de entrada es de 1 724 kPa abs (17,24 bar) a 380 °C y la presión de escape es de 103,42 kPa man (1,034 bar) a 170 °C, (ver Tabla 11 Anexos). (Santana, 2016)

2.4.4 Entrega histórica de energía al SEN.

La UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez se caracteriza por ser uno de los ingenios que más electricidad entrega al SEN, entregando hasta un 35 % de la potencia generada (ver gráfico 7). (Cervantes, 2017)

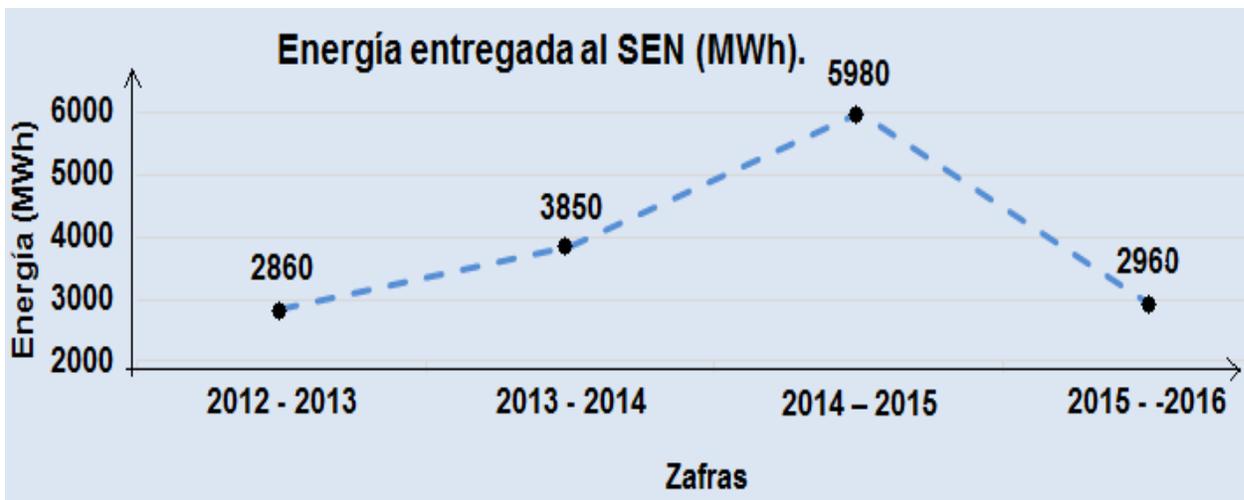


Gráfico 7. Entrega de energía al SEN. Fuente: resúmenes de fin de zafra. (2012-2016)

2.4.5 Índices históricos de generación y consumo de electricidad en el ingenio.

En el área de generación eléctrica, se lleva un estricto control de los índices de consumo, con el objetivo de garantizar la máxima eficiencia del sector energético y los menores consumos de la red eléctrica nacional. Por ello, se plantea como índices históricos de generación y consumo de electricidad por tonelada de caña en la industria: (Santana, 2017)

Índice de generación 39,5 kW/tc. Este índice representa los kW que se deben generar en los turbogeneradores por cada tonelada de caña molida, da en cierta medida una idea de la eficiencia de la industria.

Índice de exportación 12,8 kW/tc, representa la energía que es entregada al SEN ya que es la parte de la energía generada que no es consumida por la industria.

Índice de consumo 26,7 kW/tc, es la parte de la energía consumida por la empresa para el proceso productivo.

Índice de consumo del SEN 1,9 kW/tc, este índice representa la energía de la red eléctrica nacional que se le permite utilizar a la industria para procesar una tonelada de caña en caso de que los turbogeneradores no estén funcionando o no satisfacen la demanda de la industria.

2.4.6 Experiencias en el uso de RAC's y cantidades utilizadas por año.

Los RAC's constituyen buena parte de las plantaciones de caña y durante el proceso de cosecha una parte de estos residuos viene acompañando la caña. La caña es enviada en su mayor medida a los centros de limpieza en donde se separa la paja de la caña para luego enviar la caña al central. La paja de caña que queda en los centros de limpieza es usada como alimento animal y en muchas ocasiones se quema al no disponer de un uso para la misma, como es el caso de Héctor Rodríguez.

Debido a que no toda la caña es procesada en el centro de limpieza y una parte de la caña que se procesa viene directamente de los campos de cultivo, la caña que se muele puede contener hasta un 10 % de RAC's y materias extrañas. (Rubio, 2017)

2.5 Limitaciones identificadas.

Dentro de las limitaciones identificadas, se encuentra el transporte de la caña hasta el central, el cual, en numerosas ocasiones se ve obligado a parar parte de la maquinaria existente como el tándem de molida y el basculador por falta de caña.

En equipos como el cuádruple efecto, existen infiltraciones de sacarosa hacia los condensados, lo que impide que los mismos se puedan reutilizar para la generación de vapor, esto provoca un aumento del consumo de agua en la industria y un mayor consumo de energía.

2.6 Estimación del bagazo sobrante en la bioeléctrica durante la zafra.

El bagazo, obtenido de procesar la caña de azúcar, constituye una importante fuente de energía y por ello se usa para la producción de vapor de agua con el que se genera electricidad en los turbogeneradores, la mayor parte este bagazo es quemado en las calderas de vapor, quedando una parte del mismo que se comercializa a otras entidades o se desecha.

Manteniendo la norma potencial de molida de 4 600 t/d y moliendo las 573 750 tc con que contará la industria para el año 2019, se obtiene que el período de zafra durara 127 días efectivos de zafra lo que corresponde al 85 % del tiempo de duración de la zafra, produciendo 57.5 tb/h o 1 380 tb/d. Para determinar el consumo de bagazo de la caldera, se divide la energía de entrada (calor disponible) que proporciona el *software Cycle-Tempo* por el valor calórico inferior del bagazo como se muestra en la ecuación (2.1).

$$B_c = \frac{Q_d}{Q_{in}^a} \quad (2.1)$$

Donde:

B_c = consumo de combustible kg/s.

Q^d = Calor disponible. Obtenido del *software Cycle-Tempo*.

$Q^d = 95\,883$ kJ/s

Q_{in}^a = Poder calórico inferior del combustible.

$Q_{in}^a = 7\,960$ kJ/kg. (Reyes, 2017)

$$B_c = \frac{95\,883 \text{ kJ/s}}{7\,960 \text{ kJ/kg}}$$

$B_c = 12.0$ kgb/s $B_c = 43.4$ tb/h $B_c = 1\,042$ tb/d.

Si se resta el bagazo que se obtiene de moler las 4 600 tc/d con el bagazo consumido por la caldera se obtiene un excedente de 338 tb/d. El bagazo acumulado fuera de zafra será igual a la resta del bagazo acumulado durante los 127 días efectivos de zafra menos el bagazo consumido durante los 23 días de paradas de la industria (ver ecuación 2.2), en los que solo se detiene el proceso de molienda de caña y se sigue consumiendo vapor de bajos parámetros para la cocción de la sacarosa que queda en los tachos y los evaporadores, así como, la limpieza de equipos.

$$B_a = (t_d * 0.85 * b_s) - (t_d * 0.15 * c_{cb}) \quad (2.2)$$

Donde:

B_a : bagazo acumulado durante la zafra (tb/zafra).

t_d : total de días de zafra (150).

b_s : bagazo sobrante por día (338 tb).

c_{cb} : consume de bagazo de la bioeléctrica por día (1 042 tb/d).

$$B_a = (150 \cdot 0.85 \cdot 338) - (150 \cdot 0.15 \cdot 1\,042)$$

$$B_a = 19\,650 \text{ tb/zafra}$$

2.7 Estimación del bagazo que queda en la UEB Central Azucarero Abel Santamaría durante la zafra.

La UEB Central Azucarero Abel Santamaría, tiene una norma potencial de molida de caña de 3 200 t/d, siendo su norma operacional de 2 645 tc/d, produciéndose 820 tb/d. Para el año 2019 se prevé, que la entidad cuente con una masa de caña de 244 228 tc, esto permite que, si la industria se mantiene moliendo a un ritmo constante a su norma potencial, la zafra tendrá una duración de 95 días, de los cuales el 80 % corresponde a los días de molida y el 20 % a las paradas planificadas (ver ecuación 2.3). (AZCUBA, 2017)

Se realizó una simulación, del período de zafra para este central, con el objetivo de determinar el consumo de combustible del mismo y el combustible (biomasa) que puede exportar como central tributario. Se procede a calcular el combustible sobrante para el central Abel Santamaría por la ecuación (2.1).

$$B_c = \frac{Q_d}{Q_{in}^a}$$

Donde:

B_c = consumo de combustible.

Q^d = Calor disponible. Obtenido del *software Cycle-Tempo*. $Q^d = 48\,704 \text{ kJ/s}$

Q_{in}^a = Poder calórico inferior del combustible.

$Q_{in}^a = 7\,960 \text{ kJ/kg}$. (Reyes, 2017)

$$B_c = \frac{48\,704 \text{ kJ/s}}{7\,960 \text{ kJ/kg}}$$

$$B_c = 6.1 \text{ kgb/s} \quad B_c = 22 \text{ tb/h} \quad B_c = 528 \text{ tb/d.}$$

Restando el bagazo producido en el proceso de molida de la caña (820 tb) y el bagazo consumido en el central (528 tb), se obtienen 292 tb/d.

$$B_a = (t_d * 0.80 * b_s) - (t_d * 0.20 * c_{cb}) \quad (2.3)$$

Donde:

B_a : bagazo acumulado durante la zafra (tb/zafra).

t_d : total de días de zafra (95).

b_s : bagazo sobrante por día (292 tb/d).

c_{cb} : consume de bagazo del central por día (528 tb/d).

$$B_a = (95 * 0.80 * 292) - (95 * 0.2 * 528)$$

$$B_a = 12\ 160 \text{ tb/zafra}$$

2.8 Tiempo de funcionamiento de la bioeléctrica fuera de zafra.

Teniendo en cuenta el bagazo acumulado por el central Héctor Rodríguez y el central Abel Santamaría, se tiene que la bioeléctrica dispondrá de 31 810 tb para su funcionamiento fuera del período de zafra.

La bioeléctrica funcionará en el período no fabril como una planta de generación convencional. Según los datos entregados por Francisco E. Reyes, jefe de proyecto Bioeléctrica 20 MW Héctor Rodríguez, la planta funcionará (una vez concluida la zafra) con bagazo y RAC's, se procede a calcular el consumo de combustible.

$$B_c = \frac{Q_d}{Q_{in}^a}$$

Donde:

B_c = consumo de combustible kg/s.

Q^d = Calor disponible. Obtenido del *software Cycle-Tempo*.

$$Q^d = 70\ 957 \text{ kJ/s}$$

Q_{in}^a = Poder calórico inferior del combustible.

$$Q_{in}^a = 7\ 960 \text{ kJ/kg. (Reyes, 2017)}$$

$$B_c = \frac{70\,957 \text{ kJ/s}}{7\,960 \text{ kJ/kg}}$$

$$B_c = 8.9 \text{ kgb/s} \quad B_c = 32 \text{ tb/h} \quad B_c = 768 \text{ tb/d.}$$

Dividiendo el valor de biomasa con que contará la bioeléctrica (31 810 tb) por el que consume la planta por día (768 tb/d), se obtiene que la planta se mantendrá funcionando durante 41 días con el bagazo que se acumuló durante la zafra.

2.9 Energía vendida al SEN.

Para el cálculo de la energía entregada al SEN, es necesario tener en cuenta el consumo de la industria durante el período de zafra, así como, el consumo de la bioeléctrica durante el período fuera de zafra, para ello se cuenta con los índices de consumos entregados por los funcionarios de AZCUBA. Además, se tiene en cuenta los días de operación y la energía generada por el turbogenerador (20 MW). Para calcular la energía entregada durante la zafra se utiliza la ecuación (2.4), mientras que para calcular la energía entregada durante los días de operación fuera de zafra se utiliza la ecuación (2.5).

$$E_{de} = t_d * h * ee * 0.75 \tag{2.4}$$

Donde:

E_{de} : es la energía entregada en los días de zafra.

0.75: corresponde a la energía entregada al SEN, ya que la industria y la bioeléctrica consumen el 25 % de la energía generada. (AZCUBA, 2017)

t_d : son los días de zafra (150).

h : tiempo de duración de un día (24 h)

ee : generación eléctrica (20 MWh).

$$E_{de} = 150 * 24 * 20 * 0.75 = 54\,000 \text{ MW}$$

$$E_{dfz} = d * h * ee * 0.95 \tag{2.5}$$

Donde:

E_{dfz} : energía entregada en los días de funcionamiento de la bioeléctrica fuera de zafra.

0.95: corresponde a la energía entregada al SEN, ya que la bioeléctrica consumen el 5 % de la energía generada. (AZCUBA, 2017)

d: son los días que funcionará la bioeléctrica fuera de zafra (41 días).

h: tiempo de duración de un día (24 h)

ee: generación eléctrica (20 MWh).

$$41 * 24 * 20 * 0.95 = 18\ 696\ MW$$

Energía eléctrica entregada

$$E_t = 54\ 000 + 18\ 696 = 72\ 696\ MWh.$$

E_t : energía entregada al SEN en los 191 días.

Una vez concluido el período de funcionamiento se habrán exportado al SEN más de 72 000 MWh de energía eléctrica.

2.10 Impacto ambiental

Se utilizarán un total de 31 810 tb acumulado durante el período de zafra.

Según estudios realizados una tonelada de combustible fósil equivale a quemar 5.25 t de paja de caña (RAC) o 5.15 t de bagazo. (Delgado, 2009)

Si se considera la cadena de transmisión, distribución y producción de energía eléctrica usando petróleo en una termoeléctrica, producirá 890 g de CO₂ (dióxido de carbono) por cada kWh generado (ver figura 8). (Rosen, 1998, pp 7)

$$72\ 696\ MWh/año = 72\ 696\ 000\ kWh/año$$

$$(890\ g\ CO_2/kWh) * (72\ 696\ 000\ kWh/año)$$

$$64\ 699\ 440\ 000\ g\ CO_2/año = 64\ 699\ t\ CO_2/año.$$

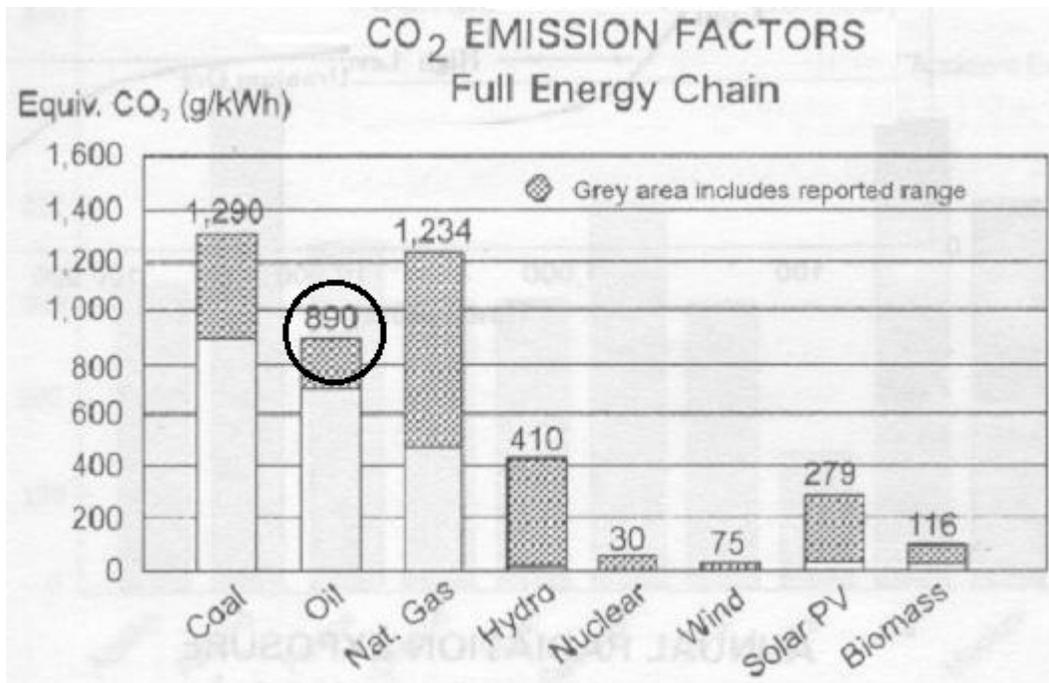


Figura 8. Factor de emisión del CO₂ para una cadena de distribución desde su extracción hasta su consumo en las termoeléctricas. Fuente: Morris Rosen, Perspectivas energéticas y papel de la energía nuclear, 1998.

2.11 Beneficios ambientales de la Bioeléctrica.

- Sustituir una cantidad de crudo nacional, que tendría que utilizarse en las centrales eléctricas convencionales para generar una energía similar. El vapor generado por la caldera será utilizado para la producción de energía eléctrica en el turbogenerador.
- Reducir las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustible fósil, que se sustituyen por el CO₂ que forma parte del ciclo natural del Carbono.
- Eliminar las emisiones de SO₂ que acompañan la quema del crudo nacional, de alto contenido de Azufre.
- Beneficios para la empresa eléctrica que suministra. Se evitan los costos de transmisión y distribución de la energía, y disponen de mayor margen de planeación en el sector eléctrico.

Conclusiones parciales

1. La puesta en marcha, de las nuevas tecnologías, permitirá el funcionamiento de la bioeléctrica fuera de zafra, al enviar el vapor que se utilizaba en el proceso de producir azúcar hacia un condensador.
2. La bioeléctrica dispondrá de 31 800 t de combustible (bagazo), con lo cual se mantendrá funcionando durante 41 días fuera del período de zafra.
3. Se le venderán al SEN más de 72 000 MWh/año de energía eléctrica, que se generará durante los 191 días que funcionará la planta en el año 2019.
4. Se dejan de emitir a la atmósfera más de 64 000 t de CO₂ que serían producto de la quema de combustibles fósiles, siendo el proyecto energéticamente ecológico.

Capítulo 3. Uso del Software Cycle-Tempo para la simulación de la planta actual y la bioeléctrica.

3.1 Software Cycle-Tempo.

Con el *software Cycle-Tempo*, se puede diseñar, analizar, optimizar y monitorear la termodinámica del sistema de energía que diseña y opera. Las características especiales incluyen: (Cycle-Tempo, 2017, pp 5)

- Amplia y válida biblioteca de modelos que incluye sistemas y componentes convencionales, pero sobre todo innovadores (células de combustible, plantas de captura de CO₂, turbogeneradores, sistemas de absorción de refrigeración, etc.).
- Modelos ya hechos de componentes e incluso de sistemas completos de conversión de energía, para que usted pueda adaptarlos a sus necesidades especiales, acortando el tiempo de desarrollo del modelo.
- Análisis exergético completo para la correcta optimización del diseño y operación de su sistema.
- Solucionador robusto y eficiente para grandes sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales, adaptados al caso especial de los balances de masa y energía.

3.2 Características del software Cycle-Tempo.

Cycle-Tempo es un programa para el modelado termodinámico y la optimización de sistemas para la producción de electricidad, calor y refrigeración. Tales sistemas a menudo comprenden varios ciclos interconectados, cada uno de los cuales consiste en aparatos diferentes. Estos aparatos están interconectados por tuberías, formando así una red compleja de flujos de masa y energía. El objetivo principal de Cycle-Tempo es calcular el tamaño de los flujos relevantes de masa y energía en el sistema. El programa contiene un gran número de modelos para aparatos y tuberías con las que puede establecer usted mismo el modelo de sistema deseado, esta flexibilidad es una ventaja significativa sobre muchos

programas existentes en los que la configuración del sistema no se puede variar, o sólo en una medida limitada. (Cycle-Tempo, 2017, pp7)

3.3 Simulación del esquema actual de la industria azucarera.

Utilizando el *software Cycle-Tempo* se simuló el proceso actual en la industria (ver figura 9 y 10), con el objetivo de obtener los valores de entalpía y los flujos de masa que salen de la caldera, para el cálculo de la eficiencia de la industria.

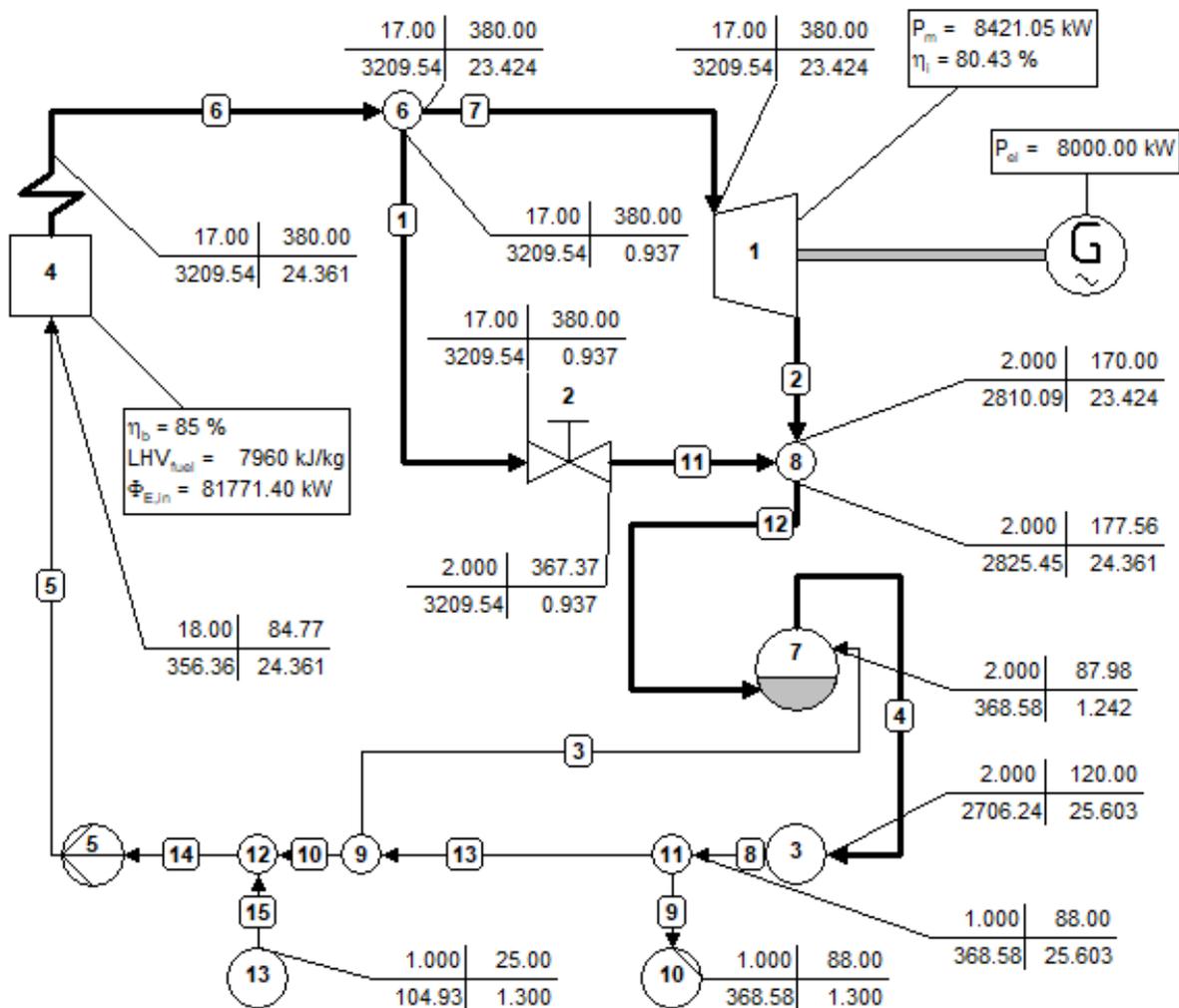


Figura 9. Esquema del funcionamiento actual del central Héctor Rodríguez. Fuente *Software Cycle-Tempo*.

p	T	$\eta_{ex,u}$ = Universal Exergy eff. [%]
h	$\dot{\Phi}_m$	$\dot{\Phi}_{\Delta ex}$ = Exergy loss [kW]
p = Pressure [bar]		η_i = Isentropic efficiency [%]
T = Temperature [°C]		LHV _{fuel} = Lower heating value fuel [kJ/kg]
h = Enthalpy [kJ/kg]		η_b = Boiler efficiency [%]
$\dot{\Phi}_m$ = Mass flow [kg/s]		$\dot{\Phi}_{ex,in}$ = Exergy input [kW]
P_m = Mechanical Power [kW]		$\dot{\Phi}_{E,in}$ = Energy input [kW]
P_{el} = Electrical Power [kW]		ex _{fuel} = Fuel exergy [kJ/kg]
$\dot{\Phi}_{\Delta E}$ = Energy loss [kW]		Δp = Pressure drop [bar]
$\eta_{ex,f}$ = Functional Exergy eff. [%]		ΔT = Temperature rise [K]

Figura 10. Leyenda del software Cycle-Tempo. Fuente *Software Cycle-Tempo*.

3.3.1 Cálculo de la eficiencia del ciclo actual de la industria azucarera Héctor Rodríguez.

$$EFF_{FERC} = \frac{P + (Q_p/2)}{F} \quad (3.1)$$

Donde:

EFF_{FERC} : representa la relación de la producción eléctrica neta más la mitad de la producción térmica neta, con el combustible total utilizado en el sistema de cogeneración.

P: es el trabajo que se produce en el generador eléctrico (kW).

P = 8 000 kW. (Santana, 2016)

($Q_p/2$) El calor del proceso (kW), se divide por dos porque no todo el calor que es enviado al proceso es utilizado y de esta manera se plantea que solo se utiliza el 50 % del calor. (Darrow, 2015, pp 4)

F: es el calor de combustión (kW). Fuente: *Software Cycle-Tempo*.

F = 81 771 kW

($Q_p/2$) = ($m_p \cdot (h_4 - h_8)$)/2 $m_p = 25.6$ kg/s $h_4 = 2 706$ kJ/kg $h_8 = 369$ kJ/kg

$Q_p = 59 828$ kW $Q_p/2 = 29 914$ kW

$$EFF_{FERC} = \frac{8 000 \text{ kW} + 29 914}{81 771}$$

$$EFF_{FERC} = 0.463 \% \quad EFF_{FERC} = 46 \%$$

3.4 Simulación del esquema actual de la industria azucarera Abel Santamaría.

La industria azucarera Abel Santamaría, cuenta con un área de caña a cortar para la zafra del año 2019 de 6 276 ha, con una proyección cañera de 244 228 tc y rendimientos del orden de las 39 tc/ha. Con el objetivo de determinar el bagazo que pudiera entregar el central Abel Santamaría, como tributario, se realizó la simulación del mismo (ver figura 11) para determinar su consumo de bagazo durante la zafra, teniendo en cuenta las modificaciones que se le realizarán al centro, con el objetivo de disminuir su consumo de vapor por tonelada de caña, hasta las 400 kgv/tc. (AZCUBA, 2017)

Este central azucarero cuenta con calderas de generación de vapor que trabajan a 320 °C y 1 724 kPa y puede generar 4 500 kWh de energía eléctrica.

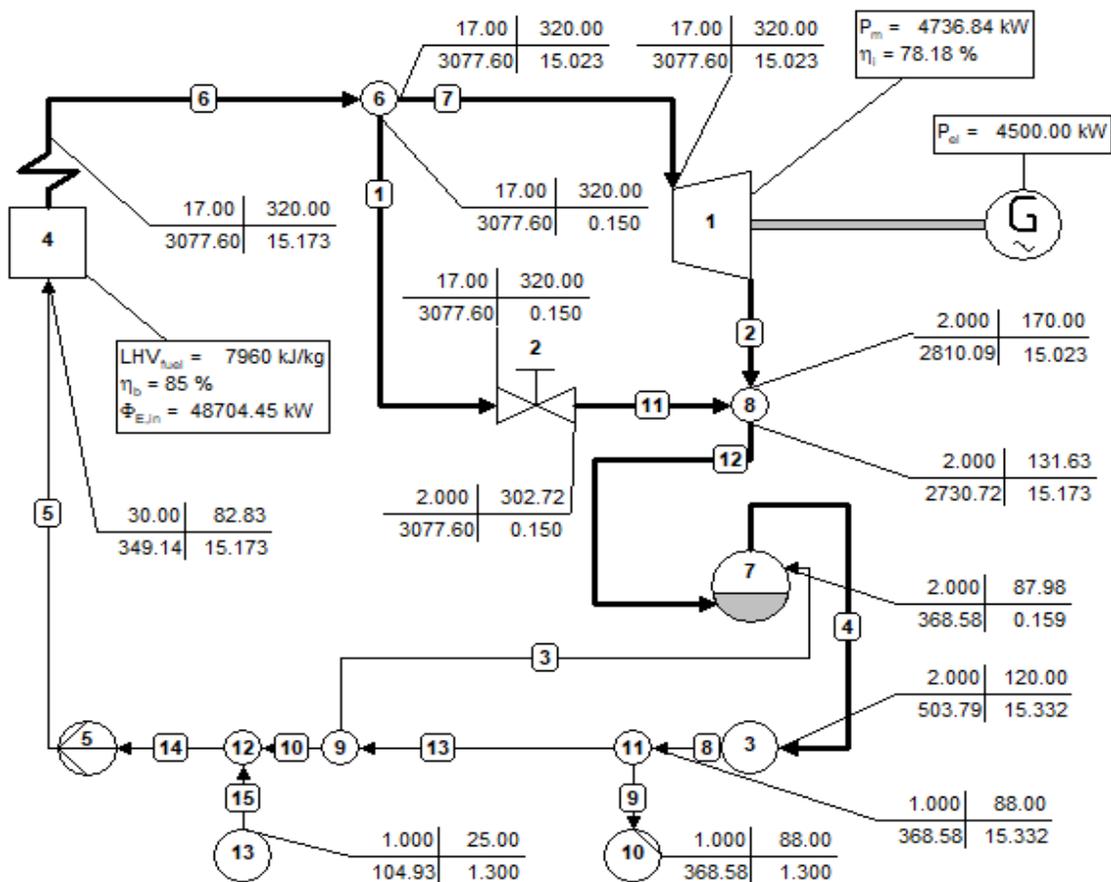


Figura 11. Esquema de funcionamiento del central azucarero Abel Santamaría. Fuente software Cycle-Tempo.

3.4.1 Calculo de la eficiencia del central Abel Santamaría.

$$EFF_{FERC} = \frac{P + (Q_p/2)}{F}$$

Donde:

EFF_{FERC} : representa la relación de la producción eléctrica neta más la mitad de la producción térmica neta, con el combustible total utilizado en el sistema de cogeneración.

P: es el trabajo que se produce en el generador eléctrico (kW).

P = 4 500 kW. (AZCUBA, 2017)

($Q_p/2$) El calor del proceso (kW), se divide por dos porque no todo el calor que es enviado al proceso es utilizado y de esta manera se plantea que solo se utiliza el 50 % del calor. (Darrow, 2015, pp 4)

F: es el calor de combustión (kW). Fuente: *Software Cycle-Tempo*.

F = 48 704 kW

($Q_p/2$) = ($m_p \cdot (h_4 - h_8)$)/2 $m_p = 15.32$ kg/s $h_4 = 2 706$ kJ/kg $h_8 = 369$ kJ/kg

$Q_p = 35 802$ kW $Q_p/2 = 17 901$ kW

$$EFF_{FERC} = \frac{4 500 \text{ kW} + 17 901}{48 704}$$

$EFF_{FERC} = 0.459 \%$ $EFF_{FERC} = 46 \%$

3.5 Simulación del esquema de funcionamiento de la bioeléctrica durante la zafra.

La bioeléctrica, que se instalará en el central azucarero Héctor Rodríguez, estará equipada con una caldera de 120 tv/h y un turbogenerador de 20 MW, este turbogenerador esta acoplado a una turbina de extracción-condensación; además, también cuenta con un recalentador que permite ingresar el agua de alimentación de la caldera a 150 °C. Para la obtención de los valores de flujo de masa así, como de entalpía de la planta, se simulo la misma en el *software Cycle-Tempo* (ver figura 12).

El consumo de vapor por tonelada de caña existente actualmente en la industria es de 480 kgv/tc, dentro de las inversiones que se realizarán, se incluye la disminución del consumo de vapor por tonelada de caña hasta 400 kgv/tc. Si se multiplica este consumo por la norma potencial de molida del ingenio (4 600 tc/d o 192 tc/h) se obtiene que el consumo del proceso es de 21.33 kgv/s. (AZCUBA, 2017)

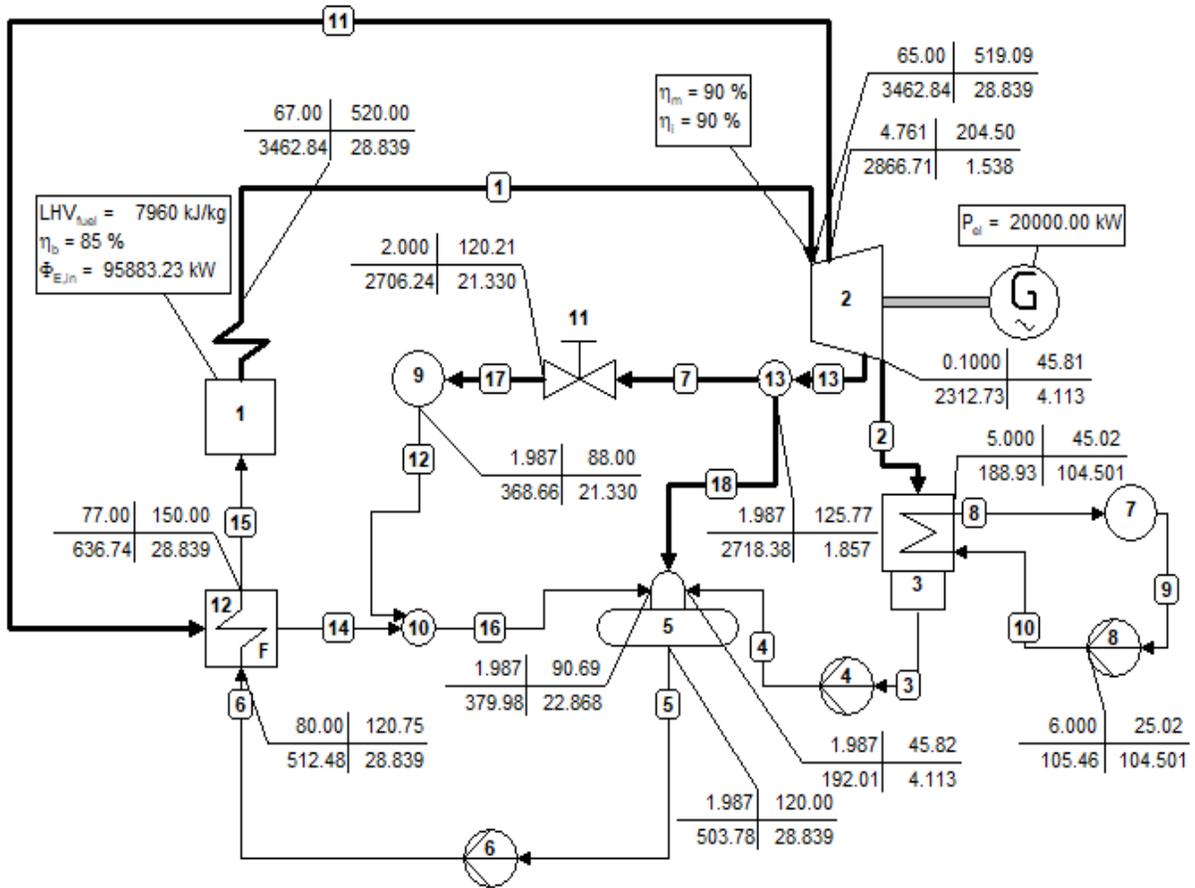


Figura 12. Esquema de funcionamiento para la bioeléctrica durante la zafra. Fuente *Software Cycle-Tempo*.

En esta simulación se aprecia que el flujo de vapor demandado a la caldera es de 28.8 kgv/s lo que equivale a 104 tv/h, siendo este valor menor que la máxima extracción que se le pudiera realizar a la caldera (33.33 kgv/s), por lo que la misma satisface las necesidades del ciclo.

3.5.1 Cálculo de la eficiencia de la bioeléctrica durante la zafra.

$$EFF_{FERC} = \frac{P + (Q_p/2)}{F} \quad (3.1)$$

Donde:

EFF_{FERC} : representa la relación de la producción eléctrica neta más la mitad de la producción térmica neta, con el combustible total utilizado en el sistema de cogeneración.

P: es el trabajo que se produce en el generador eléctrico (kW).

P = 20 000 kW. (Santana, 2016)

($Q_p/2$) El calor del proceso (kW), se divide por dos porque no todo el calor que es enviado al proceso es utilizado y de esta manera se plantea que solo se utiliza el 50 % del calor. (Darrow, 2015, pp 4)

F: es el calor de combustión (kW). Fuente: *Software Cycle-Tempo*.

F = 95 883 kW

($Q_p/2$) = ($m_p \cdot (h_4 - h_8)$)/2 $m_p = 21.33 \text{ kg/s}$ $h_4 = 2\,706 \text{ kJ/kg}$ $h_8 = 369 \text{ kJ/kg}$

$Q_p = 49\,848 \text{ kW}$ $Q_p/2 = 24\,924 \text{ kW}$

$$EFF_{FERC} = \frac{20\,000 \text{ kW} + 24\,924}{95\,883}$$

$EFF_{FERC} = 0.469 \%$ $EFF_{FERC} = 47 \%$

3.6 Simulación del esquema de funcionamiento de la bioeléctrica una vez concluida la zafra.

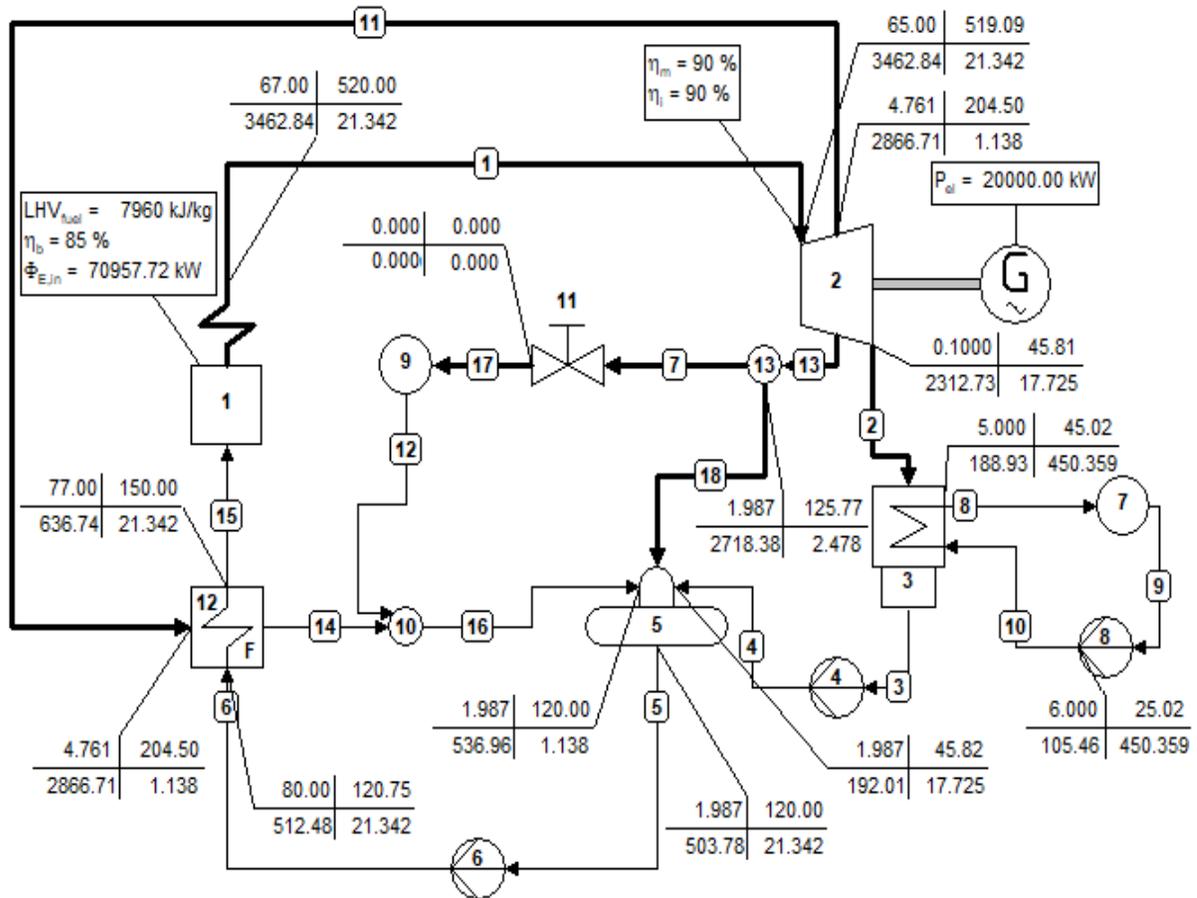


Figura 13. Esquema de funcionamiento de la bioeléctrica fuera del período de zafra.

3.6.1 Cálculo de la eficiencia de la bioeléctrica fuera de zafra.

$$EFF_{FERC} = \frac{P + (Q_p/2)}{F} \quad (3.1)$$

Donde:

EFF_{FERC} : representa la relación de la producción eléctrica neta más la mitad de la producción térmica neta, con el combustible total utilizado en el sistema de cogeneración.

P: es el trabajo que se produce en el generador eléctrico (kW).

P = 20 000 kW. (AZCUBA, 2017)

$(Q_p/2)$ El calor del proceso (kW), se divide por dos porque no todo el calor que es enviado al proceso es utilizado y de esta manera se plantea que solo se utiliza el 50 % del calor. (Darrow, 2015, pp 4)

F: es el calor de combustión (kW). Fuente: *Software Cycle-Tempo*.

$$F = 70\,957 \text{ kW}$$

$$(Q_p/2) = 0$$

$$EFF_{FERC} = \frac{20\,000}{70\,957}$$

$$EFF_{FERC} = 0.28 \% \quad EFF_{FERC} = 28 \%$$

3.7 Comparación entre las simulaciones.

La realización de las simulaciones arrojó datos sobre la eficiencia de cada planta (central azucarero y bioeléctrica), pudiendo establecerse una comparación entre estos valores como se muestra en la siguiente tabla, (ver tabla 20)

Tabla 12. Comparación entre los valores de las simulaciones realizadas en el *software Cycle-Tempo*.

Simulación	Generación vapor	Potencia eléctrica	Eficiencia neta %	Consumo bagazo
Héctor Rodríguez	85 tv/h	8 MW	46	37 tb/h
Bioeléctrica en zafra	104 tv/h	20 MW	47	43.4 tb/h
Bioeléctrica fuera de zafra	77 tv/h	20 MW	28	32 tb/h
Abel Santamaría	55 tv/h	4.5 MW	46	22 tb/h

Conclusiones parciales

1. La simulación del esquema actual, de la industria azucarera Héctor Rodríguez y posterior cálculo de la eficiencia, arrojó como resultado que la eficiencia neta de la misma es de 46 %.
2. La simulación de la bioeléctrica permitió calcular su eficiencia neta durante la zafra, siendo esta de 47 %.
3. La bioeléctrica es más eficiente que la industria azucarera actual durante el período de zafra, por lo que su construcción significa tener un mejor uso de la energía y la biomasa.
4. En el tiempo que funcionará la bioeléctrica fuera de zafra, solo generará energía eléctrica y su eficiencia será del 28 %.

Conclusiones generales.

1. La bioeléctrica dispondrá de unas 31 810 t de biomasa (bagazo), con lo cual se mantendrá funcionando durante 41 días fuera del período de zafra.
2. Se reducirá la carga contaminante (de CO₂) emitida a la atmósfera en más de 64 000 t, que serían producto de la quema de combustibles fósiles, siendo el proyecto energéticamente ecológico.
3. Se le venderán al SEN más de 72 000 MWh/año de energía eléctrica, que se generará durante los 191 días que funcionará la planta en el año 2019.
4. La bioeléctrica es más eficiente que la industria azucarera actual, siendo la eficiencia neta de la industria azucarera de un 46 % y la eficiencia neta de la bioeléctrica, durante el período de zafra, de 47 %.
5. La bioeléctrica funcionará, fuera de zafra, como una termoeléctrica y solo generará energía eléctrica por lo que su eficiencia es de un 28 %.

Recomendaciones

1. Determinar la cantidad de residuos forestales (aserrín, marabú, etc.) y RAC's de que pudiera disponer la bioeléctrica para su funcionamiento fuera de zafra.
2. Realizar un estudio del central Abel Santamaría para determinar las áreas en las que se deben invertir con el objetivo de aumentar el ahorro de bagazo de esa industria, viendo al mismo como central tributario de Héctor Rodríguez.

Bibliografía

Arturo Orgaz Córdoba (2011). Energía renovable: la biomasa, pp 5 y 7.

Caballero, Arodis (2001). 4^{to} Encuentro nacional sobre sistemas de gestión de la calidad en el MINAZ. Septiembre del 2001.

Campos Avella, J. C., Santos Macias, Leonardo, Gómez Dorta, Rafael (2003). La eficiencia energética en la gestión empresarial. Editorial Feijo, pp 14.

CEPAL (2014). Eficiencia energética en América Latina y el Caribe, pp 85-86.

Cervantes, N. S. (2017). Datos equipos.

Cid, M. V. (2009). Gestión energética eficiente en la empresa azucarera "Héctor Rodríguez., Marta Abreu, pp 3 y 5.

Delgado, I. A. V. (2009). Los residuos agrícolas de la cosecha cañera.

Dr.C. Ángel M. Rubio González (2015). Generadores de vapor. Capítulo 3. Balance térmico del generador de vapor, pp 5, 21.

Dr.C. Ángel M. Rubio González (2016). Actualidad y perspectiva de la energía en Cuba.

Dr.C. Ángel M. Rubio González (2017). Encuentro con el profesor.

Francisco E. Reyes Santos (2017). Jefe de proyecto Bioeléctrica 20 MW Héctor Rodríguez.

García, M. R. (2015). Análisis de los factores que más inciden sobre el rendimiento industrial azucarero.

Grupo AZCUBA. 2017. Encuentro con los funcionarios del grupo empresarial AZCUBA.

Haikel Acea Consuegra, Tania Cabrera Esmoris, Xiomara Consuegra Pallera (2015). Bioeléctrica de 20 MW en la UEB Central Azucarero Jesús Rabí, pp 2, 3 y 5.

Hernández, W. A. M. (2010). Las calderas de los ingenios azucareros y la austeridad económica.

José A. Motito, S. M. S. (2013). Estudio energético en la UEB central Paquito Rosales de la provincia Santiago de Cuba.

Ken Darrow, Rick Tidball, James Wang y Anne Hampson (2015). Catalog of CHP technologies. Appendix A: Expressing CHP Efficiency, pp 4.

León-Martínez, T. S. D.-R., Daisy; Triana-Hernández, Omar; Medina-Estevez, Marelys (2013). "Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad."

Moises Alves (2015). Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel, pp 2.

Morris Rosen (1998). Perspectivas energéticas y papel de la energía nuclear. No. 25. ISSN 0864-084X.

Napoleón Vicente Blanco-Orozco, E. A.-D. (2012). El uso eficiente de la energía eléctrica en los ingenios azucareros como contribución al desarrollo sostenible de Nicaragua, pp 7.

OLADE (2010). "Energía renovable, biocombustible y caña de azúcar en Cuba, pp 104 y 108.

P. F. Beltrán, J. B. C. M., J. R. F. Veja, I. F. Acea, A. S. Medina, V. Mencia (2005). "Los Residuos Agrícolas y Cañeros como Alternativa Energética del Presente y del Futuro."

Quimica, D. d. I. (2010). Balance de masa. **VI**,

Roasleda Rúa Ourense (2005). Energía de la biomasa.

Rodríguez, Y. G. (2015). Optimización del sistema energético de un central azucarero para maximizar el excedente de bagazo, pp 18.

Rosa Virginia Garces Paz, Sandra Viviana Martinez Silva (2013). Estudio del poder calorico del bagazo de caña de azúcar.

Santana, I. R. C. (2016). UEB Central Azucarero Hector Rodriguez.

Santana, R. C. (2017). Ficha técnica.

Silvio de Oliveira Jr., Luiz Felipe Pellegrini (2010). Plantas de cogeneración con caña de azúcar, pp 6.

Socarrás, J. (2017). Calentadores, evaporadores y tachos.

Toledo, E.; Cabrera, J. A.; Leyva, A.; Pohlan, H. A. J. (2008). Estimación de la Producción de Residuos Agrícolas en Agro-ecosistemas de Caña de Azúcar, pp 9.

www.asimptote.nl/software/cycle-tempo

www.Cycle-Tempo.nl

www.energia.gov.ar (2008). Energías Renovables. Energía Biomasa.

Yunes A. Cengel, Michael A. Boles. (2012). Termodinámica. McGRAW-HILL, pp 558.

Anexos

Tabla 1. Situación de riego. (AZCUBA, 2017)

Años	2017	2018	2019	2020
Fondo de tierra (ha)	10 493	10 493	10 493	10 493
Años	2021	2022	2023	2030
Fondo de tierra (ha)	10 493	10 493	10 493	10 493

Tabla 2. Datos de los basculadores de carros de ferrocarril. (Santana 2017)

Marca	Típico	Modelo	Típico
Tipo	Lateral	Año fabricación	1 966
País	Cuba	Cantidad pistones	1
Ángulo inclinación	75 ⁰	Capacidad	42 t

Tabla 3. Datos de los basculadores para camiones. (Santana 2017)

Ángulo inclinación	75 ⁰	Cantidad pistones	2
Año fabricación	2014	Tipo	Traseros
País	Cuba		

Tabla 4. Datos de los molinos. (Santana 2017)

Molino	Tipo	Fabricante	Tándem	Presión hidráulica lb/plg ²
1	A	Fulton	Único	3 700 (25 511 kPa)
2	A	Fulton	Único	3 500 (24 132 kPa)
3	A	Fulton	Único	3 500 (24 132 kPa)
4	A	Fulton	Único	3 500 (24 132 kPa)
5	A	Fulton	Único	3 500 (24 132 kPa)

Tabla 5. Datos calentadores. (Socarrás 2017)

Tipo	WEBRE	Superficie calórica	1 407 pies ² (131 m ²)	
Número pases	6	Tubos x pase	43	
Diámetro tubos	32 mm	Largo tubos	4 950 mm	
Flujo jugo	205 m ³ /h			
Variables	Calentador			
	Líquido - Líquido	Primario	Secundario	Jugo Clarificado
Temperatura Entrada (°C)	36	42	82	95
Temperatura	42	82	104	112

Salida (°C)				
Procedencia del Vapor	Condensados	Vaso 2	Pre	Escape
Presión del Vapor	-	7 "Hg (23,7 kPa)	5 lb/plg ² (34,5 kPa)	12 lb/plg ² (83 kPa)
Material	Cobre	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable

Tabla 6. Datos evaporadores. (Santana 2017), (Socarrás 2017)

Variables	Vasos Evaporadores					
	Pre 1	Pre 2	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4
Presión calandria	12 lb	12 lb	5 lb	2,5 lb	7 "Hg	14 "Hg
Temperatura Calandria	saturado	saturado	saturado	saturado	saturado	saturado
Presión cuerpo	6 lb	6 lb	2,5 lb	7 "Hg	14 "Hg	24 "Hg
Temperatura cuerpo	saturado	saturado	saturado	saturado	saturado	saturado
PCSC	10 234	9 695	15 000	15 000	8 000	7 279

Tabla 7. Datos de los tachos. (Santana 2017), (Socarrás 2017)

Tachos	Modelo	Tipo	Superficie calórica (pies ²)	Vacío ("Hg)	Uso
1	L-H	CSP	2 100	25	Cristalizar
2	M-D	STD	3 000	25	MCA
3	B-O	STD	3 750	25	MCA
4	M-D	STD	3 000	25	MCA
5	L-H	L-H	1 800	25	MCB
6	L-H	L-H	4 200	25	MCC
7	L-H	L-H	3 585	25	MCC

Tabla 8. Toneladas de vapor consumido / toneladas de caña molida. (Santana 2017)

Zafra	Días efectivos	Caña molida (t)	Vapor consumido (t)	tv/tc molida
2012 - 2013	83	374 070	187 248	0,50
2013 - 2014	85	364 990	191 760	0,53
2014 - 2015	97	444 497	218 832	0,49
2015 - 2016	90	409 111	203 040	0,49

Tabla 9. Parámetros de las calderas activas. (Santana 2017)

Marca	Retal Modificada	Presión	17,24 bar
Capacidad	55 t/h	Temperatura vapor	400 °C

Tabla 10. Parámetros de la caldera de respaldo. (Santana 2017)

Capacidad	25 t/h	Presión	17,24 bar
Temperatura vapor	350 °C		

Tabla 11. Datos de los turbogeneradores. (Santana 2017)

Tipo	T-4-3 600-T3	País	URSS
Frecuencia	60 Hz	Coseno Ø	0,8
Voltaje	6 300 V	# fases	3
Potencia	4 MW	Agua enfriamiento	50 m³/h
Eficiencia	96,6	Masa	15 900 kg
Flujo vapor t/h	42	Amperaje estator	458 A
Amperaje rotor	250 A	Voltaje estator	6 300 V



Anexo 1. Pre-evaporadores. Fuente: Elaboración propia, febrero 2017.