

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Estudio de Energía y Tecnologías
Ambientales

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación termo-económica del esquema de cogeneración en pequeños centrales azucareros, propuestas de mejora, estudio de caso: Carlos Baliño.

Autor: Julio Cesar González Morffi

Tutor: Dr. Idalberto Herrera Moya

Santa Clara, julio/ 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Center for the Study of Energy and
Environmental Technologies

DIPLOMA THESIS

Title: Thermo-economic evaluation of the cogeneration scheme in small sugar mills, improvement proposals, case study: Carlos Baliño.

Author: Julio Cesar González Morffi.

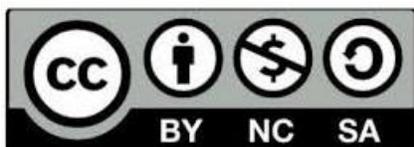
Thesis Director: Dr. Idalberto Herrera Moya.

Santa Clara, july / 2019
Copyright©UCLV

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

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

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

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Resumen:

En el presente trabajo se realiza una evaluación termo-económica de un esquema típico de cogeneración para pequeños centrales azucareros, tomando como caso de estudio la UEB Central Carlos Baliño. Primeramente, se realizó un estudio del contexto en que se desempeña la industria azucarera en el mundo y las perspectivas de la misma en Cuba, así como de la influencia de la misma en el panorama energético tanto a nivel internacional como nacional. Luego se exponen las tecnologías de los esquemas energético más usados en la industria azucarera, determinando las variables e indicadores de mayor influencia para los mismos. Se determinó el balance energético para el esquema actual de la UEB Central Carlos Baliño, el cual presenta una caldera con una capacidad de 60 ton/h, dos turbinas de contrapresión con una potencia de 1.5 MW cada una y un índice de consumo de vapor de 0.48 ton_v/ton_{cm}. Posteriormente se proponen mejoras generaron dos escenarios de estudio y que contribuyeron a incrementos de la potencia instalada, en el escenario 1 de 225 kW y en el escenario 2 de 6,441 kW. Por último, se hizo un análisis de los resultados basándose en la factibilidad económica y ambiental de ambos escenarios.

Abstract:

In the present work a thermo-economic evaluation of a typical cogeneration scheme for small sugar mills is carried out, taking as a case study the UEB Central Carlos Baliño. Firstly, a study was carried out of the context in which the sugar industry operates in the world and its prospects in Cuba, as well as its influence on the energy scene both at the international and national levels. Then the technologies of the most used energy schemes in the sugar industry are exposed, determining the variables and indicators of greatest influence for them. The energy balance was determined for the current scheme of UEB Central Carlos Baliño, which has a boiler with a capacity of 60 ton/h, two backpressure turbines with a power of 1.5 MW each and a steam consumption index of 0.48 ton_v/ton_{cm}. Subsequently proposed improvements generated two study scenarios that contributed to increases in the installed power, in scenario 1 of 225 kW and in scenario 2 of 6,441 kW. Finally, an analysis of the results was made based on the economic and environmental feasibility of both scenarios.

Índice:

Introducción:	1
Capítulo 1. Marco Teórico.	4
1.1. Panorama de la industria azucarera a nivel mundial y en Cuba.	4
1.2. Influencia de la industria azucarera en el panorama energético en Cuba.	5
1.3. Esquemas energéticos más usados en la industria azucarera.	7
1.4. Variables e indicadores de mayor influencia en los esquemas energéticos.	9
Conclusiones Parciales:	13
2.1. Características del esquema actual de cogeneración.	14
2.2. Análisis del comportamiento estadísticos de los períodos de zafras.....	15
2.3. Balance energético esquema actual central Carlos Baliño.....	19
2.4. Balance energético del escenario 1.....	26
2.5. Balance energético del escenario 2.....	32
Conclusiones Parciales:	38
3.1. Análisis de factibilidad económica y ambiental del escenario 1.....	40
3.2. Análisis de factibilidad económica y ambiental del escenario 2.....	44
3.3. Comparación de los escenarios.	47
Conclusiones:.....	51
Recomendaciones:.....	52
Bibliografía.....	53
Anexos:.....	55

Introducción:

El mundo se ha visto en la necesidad de trazar políticas de eficiencia energética debido al elevado incremento del consumo de energía a causa del desarrollo. El esquema energético global tiene como principal fuente energética los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) los cuales no son renovables, son altos contaminantes, están concentrados en pocas regiones de la tierra y son utilizados de forma muy ineficiente.

Cuba se ha visto en la obligación de trazar políticas de eficiencia energética y llevarla principalmente a la industria azucarera para lograr altos niveles de producción con mayores índices de eficiencia, con el objetivo de lograr una mayor generación de energía eléctrica.

En el proceso azucarero el vapor generado a base de bagazo y residuos agrícolas cañeros principalmente, es un portado energético clave. Por lo que es necesario elevar los parámetros de trabajo del ciclo de generación de potencia e implementar todas las mejoras conceptualmente posibles.

Actualmente la matriz energética nacional la industria azucarera aporta aproximadamente el 3.5 por ciento de la generación de electricidad. Por las necesidades de elevar la eficiencia energética del país en diciembre del 2012 en el decreto presidencial número 3 se dispuso la creación de una Comisión Gubernamental para la elaboración de la Política para el desarrollo prospectivo de las energías renovables en el período comprendido del 2014 hasta 2030. En la actualidad, las energías renovables solo representan el 4.6 por ciento de la generación y el resto lo aportan los combustibles fósiles. En el 2014 el Consejo de Ministros aprueba la política y su cronograma de implementación en donde se encuentra la implementación de alrededor de 25 bioeléctricas con una producción en el 2030 de 872 MW para Sistema Eléctrico Nacional (SEN). 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)

El primer proyecto de bioeléctrica está situado en la provincia de Ciego de Ávila se prevé que producirá electricidad a partir del bagazo que genere el central azucarero Ciro Redondo y en el tiempo que concluya la zafra utilizará marabú el cual es abundante en dicho territorio.

La planta entregará toda la electricidad que necesita la fábrica para la producción de azúcar y el resto lo aportará al Sistema Energético Nacional. La inversión tiene un costo de 186 millones de dólares, y será la primera planta de Cuba generadora de energía mediante el uso de biomasa, cuando entre en funcionamiento en diciembre del 2019.(Cubadebate, 2017)

Para elevar la sostenibilidad de las bioeléctricas se prevé que los pequeños centrales azucareros que tributen el sobrante de bagazo hacia dichas plantas para disponer de más cantidad de combustible para generar electricidad con eficiencia, a esos pequeños centrales, como es el caso del central Carlos Baliño, se les denominan tributarios.

La fábrica 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 zafra: 1989 y 1990 de azúcar refino B, también con resultados satisfactorios en cuanto a la calidad.

Hoy en día 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.

Se planteó la siguiente **hipótesis:**

Implementar mejoras para elevar la eficiencia del esquema energético de la UEB Carlos Baliño con vista a ahorrar bagazo e incrementar la generación de energía eléctrica.

Objetivo general:

Evaluar termo-económicamente el esquema energético de la UEB Carlos Baliño y proponer soluciones para elevar su eficiencia energética con vistas a ahorrar bagazo e incrementar la generación de electricidad.

Objetivos específicos:

1. Determinar los referentes teóricos para evaluar posibles mejoras en los esquemas de cogeneración de pequeños centrales azucareros, con énfasis en las soluciones con perspectivas de aplicación en la UEB Central Carlos Baliño.
2. Realizar la evaluación termo económica del esquema actual en la UEB Central Carlos Baliño y proponer soluciones que mejoren el desempeño energético y generen ahorro de bagazo.
3. Analizar la factibilidad económica y ambiental de las soluciones propuestas mediante el uso de indicadores económicos, como el costo nivelado de la energía generada, costo de inversión, VAN y TIR, y ambientales como las emisiones evitadas de CO₂.

Capítulo 1. Marco Teórico.

1.1. Panorama de la industria azucarera a nivel mundial y en Cuba.

La industria azucarera ha experimentado desde sus inicios un desarrollo importante debido a las posibilidades de producir azúcar y otros derivados como principales productos, y adicionalmente generar energía eléctrica. Por lo antes expuesto se dirigen esfuerzo para lograr mayores índices de eficiencia tanto en los procesos de fabricación del azúcar, 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.

Se trabaja a nivel internacional puesto que esta energía además de ser menos costosa es renovable y evita el consumo de combustible fósil y por tanto emisiones de gases de efecto invernadero perjudiciales para el medio ambiente.(Arocha Morfa, 2016)

La agroindustria azucarera cubana constituyó por más de dos siglos el eje principal del desenvolvimiento de la economía y la sociedad cubana.

En septiembre del año 2002 fueron presentadas por el MINAZ, las bases para la estrategia del frente científico técnico azucarero, para el redimensionamiento y reestructuración de la agroindustria azucarera cubana y el análisis de la estrategia para la producción y exportación de azúcar.(Peña Castellanos, 2003)

La estrategia presentada en septiembre de 2002 por el MINAZ (MINAZ, 2002), señaló 4 elementos básicos:

- a) Necesidad de reestructurar y redimensionar la agroindustria en busca de elevar ingresos netos mediante la disminución de costos. En este sentido se dedicarán 71 centrales a la producción de azúcar y 14 a la producción de alcohol y mieles integrales, todos los cuales tendrán que producir con alta eficiencia

- b) El objetivo de la producción de azúcar en Cuba será la satisfacción del consumo interno en unas 700 mil toneladas y acceder al mercado exterior cuando la relación precio costo lo justifique.
- c) Se reduce el potencial máximo de producción de azúcar a 4 mil millones toneladas anuales, en plantaciones que promedien sobre 54 toneladas por hectáreas.
- d) Lograr costos de producción de azúcar no superiores a 60 dólares y 260 pesos por tonelada.

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 en Cuba.

La tendencia mundial es a una mayor eficiencia energética que genere bagazo sobrante en el orden del 30 - 35 % que permita su empleo en la industria de derivados (tablero, papel, furfural, etc.) o en la cogeneración de energía. Ha pasado la época en que quemar bagazo de forma ineficiente era la solución para eliminar un residuo molesto, el reto de hoy en día es cómo ahorrar más bagazo.

Cuba ha acumulado experiencias en el diseño de esquemas energéticos más eficientes. La búsqueda de eficiencia en esta área va en muchas ocasiones acompañada de procesos inversionistas que no siempre son posibles acometer. Se requiere un estudio técnico económico más profundo que permita dirigir la decisión inversionista hacia el blanco con más perspectivas económicas.(Casanova Cabeza, 2015)

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_{caña}). 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.(Rubio González. Angel M, 2014)

El costo de una instalación de ese tipo se estima en 1.8 millones de dólares por MW instalado, para la adquisición de los equipos de las cinco áreas que las integran: plantas eléctricas (turbogeneradores), de vapor (calderas), de tratamiento de agua, y almacén de biomasa y enlace con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Si a ello se suman las obras de construcción y montaje la inversión puede llegar a inducir un costo de 2 millones 200 mil dólares por MW instalado. 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 de petróleo por cada tonelada de azúcar fabricada. En el programa de AZCUBA en el periodo 2014 hasta 2030 los ingenios molerán durante (150 - 180) días al año, a no menos del 85 % de su capacidad.(Salomón, 2016)

La caña genera suficiente bagazo, para generar todo el vapor necesario para la producción cuando se utiliza como combustible en los hornos de la caldera. Con un volumen de fibra en la caña de 12 % – 14 %, un buen balance y diseño de la fábrica, se logra un exceso de bagazo que puede usarse para otros propósitos.(Hugot, 1986)

Aproximadamente el 30 % en masa de la caña molida es bagazo, una disminución de la producción de azúcar, también reduce la producción de bagazo, y con ello la

posibilidad de producir energía eléctrica renovable. En Cuba la producción de energía eléctrica en la industria azucarera representaba en 1993 el 8.1 % de la generación total (Foresightcuba, 2013). En el 2013 representa cerca de un 3.5 %. (Hernández Martínez, 2018)

Para elevar la generación de electricidad en la industria azucarera el país a trazado una política de inversión para lograr el montaje de alrededor de 25 bioeléctricas para el año 2030, comenzando con 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 llegar aportar conjuntamente unos 140 MW. En la actualidad la industria azucarera cubana, con una generación total de 626 GWh, 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.

1.3. Esquemas energéticos más usados en la industria azucarera.

En la actualidad se utilizan una serie de esquemas en la generación de energía en la industria azucarera, cada uno con distintos parámetros de operación y difieren además en el tipo de tecnología instalada.

El sistema existente en Cuba es mayoritariamente de turbinas de vapor de contrapresión (TV/C) (figura 1), con índices de generación entre 20 y 30 kWh/ton_{caña molida}, debido a la obsolescencia de los esquemas termo-energéticos y del equipamiento.

Existen cuatro posibilidades para cogeneración en la industria azucarera actual, estas son:(Pérez Ramos, 2014)

- 1) Turbinas de vapor a contra presión.
- 2) Turbinas de contra presión con extracción de vapor automática (figura 2).
- 3) Combinación de estos ciclos en una turbina de gas con recuperación de calor de los gases con un generador de vapor.

- 4) Combinación de estos ciclos con una turbina de gas con recuperación del calor con ayuda de un equipo de post-combustión.

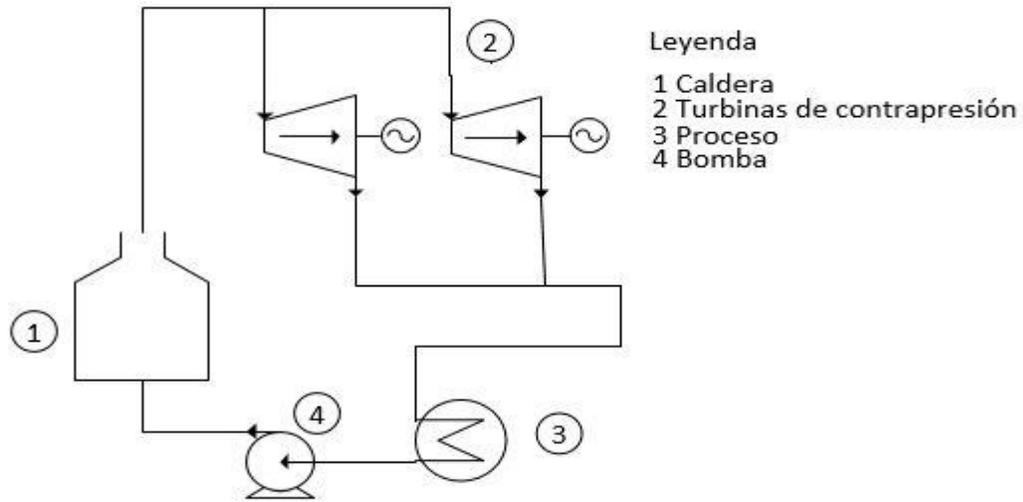


Figura 1: Esquema de generación con turbina de contrapresión.

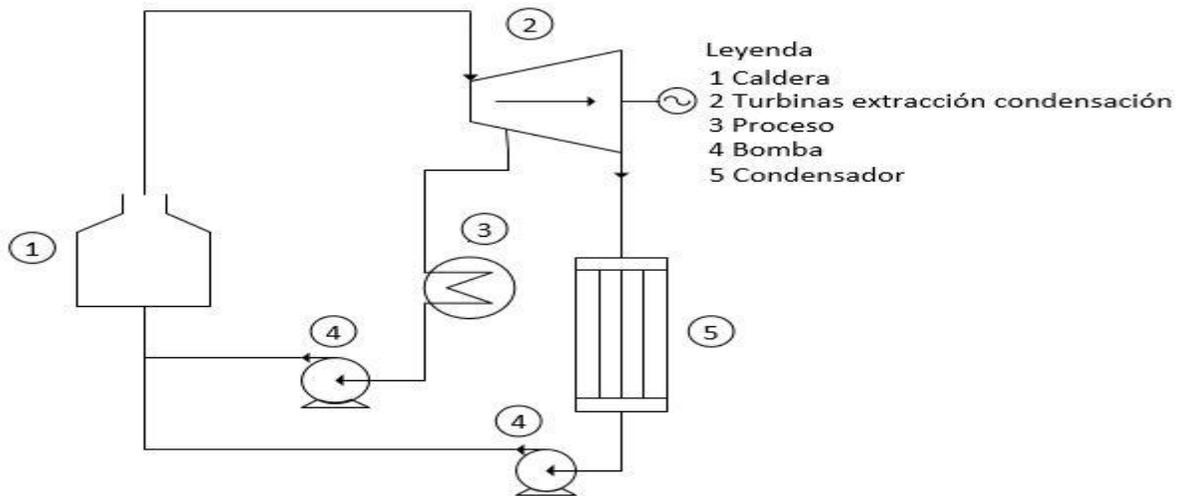


Figura 2: Esquema de generación con turbina de condensación con extracciones.

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 (figura 3).

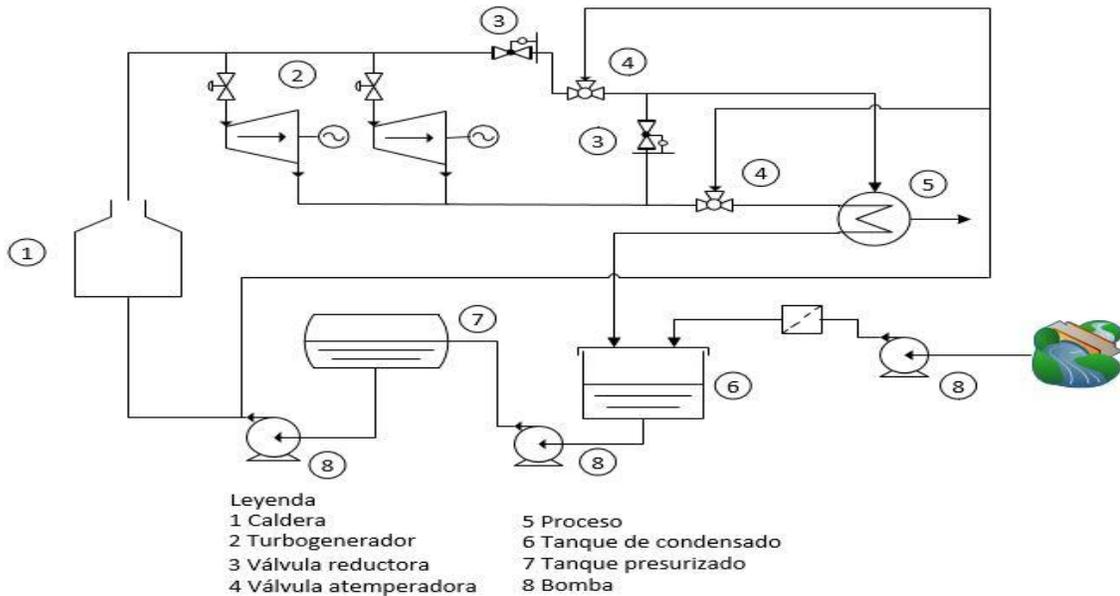


Figura 3: Esquema de generación con turbina de contrapresión Carlos Baliño.

El Central Carlos Baliño está constituido por nueve áreas: 1- Área de recepción, manipulación y preparación de la caña, 2-Planta moledora, 3-Purificación, 4-Evaporación y cristalización, 6-centrifugación, 7-Peso y embalaje, 8-generación de vapor, 9-Planta eléctrica e instrumentación. Sus producciones actuales consisten en azúcar ecológica y convencional, miel ecológica, cachaza, electricidad y bagazo (Ruíz, 2006).

1.4. Variables e indicadores de mayor influencia en los esquemas energéticos.

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 molida 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)

De las variables más importantes en los esquemas energéticos de la industria azucarera se tiene principalmente la presión y temperatura, lograr aumentar la presión y la temperatura durante el proceso de adición de calor posibilitaría un aumento de la eficiencia, siempre respetando las limitaciones metalúrgicas de los materiales. La temperatura media del líquido debe ser tan alta como sea posible durante la adición de calor y lo más baja posible durante el rechazo de calor. La reducción de la presión de funcionamiento del condensador reduce automáticamente la temperatura del vapor, y por lo tanto la temperatura a la cual el calor es rechazado.

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.

$$IGE = E_e / c_m \quad (1)$$

Donde:

E_e = energía generada menos consumo interno (kWh)

c_m = cantidad de caña molida (ton/h)

IGE= energía excedente disponible por hora (kWh/ton_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. A menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos.

$$IGV_b = m_v / m_b \quad (2)$$

Donde:

m_v = cantidad de vapor generado en caldera (s), ton_{vapor}/h

m_b = cantidad de bagazo quemado en caldera (s) ton_{bagazo}/h

Índice de generación de electricidad (GE):

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

$$GE = Eg/Cm \quad (3)$$

Donde:

Eg= energía generada (kWh)

Cm=cantidad de caña molida (ton_{caña})

Índice de consumo de vapor (GV):

Representa el consumo de vapor por la cantidad de caña molida.

$$GV = Vg/Cm \quad (4)$$

Donde:

Vg= Vapor consumido (ton_{vapor})

Cm=cantidad de caña molida (ton_{caña})

Considerando el índice de consumo de vapor como un indicador de gran importancia a la hora de realizar los balances de masa y energía en la industria azucarera. Se encuentran varios criterios de distintos autores para definir el valor de este índice cuando no se logra determinar en la práctica.

Índice de consumo de vapor:(Sicilia Alba, 2014)

- Central azucarero típico 550 ton_{vapor}/ton_{caña}, 20 kWh/ton_{caña} de electricidad.
- Fábricas modernas 350 ton_{vapor}/ton_{caña} y 50 kWh/ton_{caña} de electricidad.

El valor que presenta el ingenio Santa Teresa, S.A. es aproximadamente de 0.507 toneladas de vapor por toneladas de caña molida. (Escamilla Cóbar, 2007)

Dado un consumo de vapor total, escasamente superior que para la fábrica electrizada de 0.47 toneladas de vapor por toneladas de caña molida. Esto puede variar de un máximo de 0.75 toneladas de vapor por toneladas de caña molida en una fábrica pobremente provista que está fabricando el azúcar blanco, o a un mínimo de 0.36 toneladas de vapor por toneladas de caña molida en una fábrica

moderna que produce el azúcar crudo. Generalmente, el consumo de vapor varía entre 0.45 y 0.55 toneladas de vapor por toneladas de caña molida. (Hugot, 1986)

Un consumo de vapor para una fábrica de azúcar que opera con un plan de fabricación de azúcar sería un objetivo bastante realista si el valor se acercara a 0.50 toneladas de vapor por toneladas de caña molida.(García Rodríguez. Yunier.Msc López Hervis. Yoney.Dr Benítez Hernández. Agustín, 2014).

En el central azucarero Carlos Baliño, en el año 2016 se obtiene un índice de consumo de 0.47 toneladas de vapor por toneladas de caña molida para la zafra entre 2015 - 2016 y para la zafra 2014-2015 se obtuvo 0.49 toneladas de vapor por toneladas de caña molida. (Arocha Morfa, 2016)

En la mayoría de los casos en los centrales azucareros el consumo de vapor por tonelada de caña oscila entre 0.40 y 0.60 toneladas de vapor por toneladas de caña molida. (Bartens, 2007)

La mayoría de los generadores de vapor que operan en las plantas de cogeneración para la exportación de electricidad logran el valor más bajo de toneladas de vapor por toneladas de caña molida, mientras el valor más alto se encuentra en las fábricas que suministran vapor a otras actividades como una refinería.(Bartens, 2007)

En el proceso el mínimo uso de vapor que usa la tecnología presente se estima para 0.35 toneladas de vapor por toneladas de caña molida(Reid and Rein, 1983), 0.33 toneladas de vapor por toneladas de caña molida(Broadfoot, 2001) y 0.34 toneladas de vapor por toneladas de caña molida(Kong Win Chang, 2001). Estos valores sólo pueden lograrse con integración extensa del proceso que tiene como implicaciones adversas que la operabilidad de la planta siempre trabaje muy firmemente.(Bartens, 2007)

Partiendo de la información recopilada y su previo estudio el índice de consumo de vapor según las recomendaciones para un central azucarero se encuentra entre un 0.35 a 0.55 toneladas de vapor por toneladas de caña molida.

Conclusiones Parciales:

1. La necesidad que afronta el mundo y en especial el país de desarrollar y poner mayor atención a la industria azucarera, ya que puede llegar a hacer el eje principal de la economía y la sociedad.
2. En consecuencia, al deterioro progresivo del medio ambiente, la industria azucarera se lanza como una de las principales vías de producción de electricidad junto a las energías renovables, ya que son formas más limpias de obtener electricidad sustituyendo los combustibles fósiles (altos contaminante).
3. Se verifica la necesidad de hacer el máximo de mejoras en los esquemas energéticos de la industria azucarera, para lograr altos índices de eficiencia en la producción.
4. Tener controladas las principales variables del esquema energético es esencial para llevar constancia de cómo puede variar la eficiencia en la industria azucarera.
5. El índice de consumo de vapor, según las referencias consultadas, para un central azucarero se encuentra entre un 0.35 a 0.55 toneladas de vapor por toneladas de caña molida.

Capítulo 2. Balance energético, estudio de caso: UEB

Carlos Baliño

El esquema actual del central azucarero Carlos Baliño presenta una capacidad de molida cerca 2358 ton/día y 98.5 ton/h al 100 %. El período de zafra por lo general es desde el mes de diciembre hasta el mes de abril, una vez concluida esta se pasa al mantenimiento y reparación de todo el equipamiento del central en cada una de sus áreas, para posteriormente aplicar la Norma Técnica-43 que consiste en la prueba y puesta en marcha de todo el equipamiento, hasta llegar a la etapa de arrancada de la zafra.(Ruíz, 2006)

2.1. Características del esquema actual de cogeneración.

El sistema de cogeneración está constituido por una caldera de vapor de tecnología alemana instalada en el año 2010 (Tabla. 1), diseñada para trabajar con biomasa, su índice de generación es de 2.2 tonelada de vapor/ tonelada de bagazo, el calor producido es enviado a la planta eléctrica constituida por dos turbogeneradores también de tecnología alemana de 1500 kW cada uno para un total de 3.0 MW que generan a su vez la corriente que consume el ingenio y puede entregar al SEN. El sistema debe generar 26 kWh por cada tonelada de caña que se procesa, el mismo debe entregar al SEN 2.8 kWh por cada tonelada procesada.(Ruíz, 2006)

Tabla. 1 Datos de chapa de la caldera

Modelo	CAP60-00-00-00IT
Eficiencia	82.50%
Tecnología	Alemana
Índice de generación	2.34 ton _{vapor} /ton _{bagazo}
Capacidad máxima generación de vapor	60 ton _{vapor} /h
Presión de vapor sobrecalentado	17.5 kg/cm ²

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 (Tabla.2).

Tabla. 2 Datos técnicos de los turbogeneradores

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 ton _{vapor} /h
Cantidad de vapor marchando en vacío	aprox. 7,2 t _{vapor} /h
Cantidad de escape de vapor a 0,11MPa	aprox. 120 kg _{vapor} /h – 150 °C
Promedio de consumo	19 ton _{vapor} /h
Eficiencia	69%

2.2. Análisis del comportamiento estadísticos de los períodos de zafra.

Para el análisis de las muestras de campañas de zafra azucarera se parte de los datos recolectados y facilitados por los registros de plan de producción del central Carlos Baliño. Se posee los datos de producción día a día de las zafras 2011 – 2012, 2013 – 2014, 2015 – 2016 y 2018 – 2019.

La zafra del 2011 – 2012 comenzó en el mes de diciembre y culminó en abril con un periodo de zafra 125 días (Tabla. 3).

Tabla. 3 Resumen de la zafra 2011 – 2012.

Técnico Económico	Plan	Real	%	Dif.
Toneladas de caña a moler total	293094.4	168375.3	57.45	-124719
% de Molida	100	57	57	-42.55
toneladas caña 8 horas	23563.49	94155.46	400	70591.97
Autoabastecimiento energía (%)	104.6	98	93	-7.09
Energía generada (kWh)	4377757	5311958		
Consumo al SEN (kWh)	328331.7	659608		
Entrega energía al exterior (kWh)		489832		
Entrega al SEN por cogeneración (kWh)	521963.3	524127.6		
Toneladas bagazo vendido		9870.03		
Generación propia horario pico (kWh)	880586.2	1026230		
Consumo SEN horario pico (kWh)	66043.97	104892.3		
Entrega SEN en horario pico por cogeneración (kWh)	104993	93684		
Demanda máxima empresa en horario pico (kWh)		183444		

La cantidad de caña molida fue 168375.3 toneladas el 57.45 % del plan, la producción total de energía en la zafra corresponde a 5311958 kWh con un promedio de 96.17 toneladas de caña molida por hora.

La zafra 2013 – 2014 comenzó en diciembre y culminó en mayo con una duración de 155 días (Tabla. 4).

Tabla. 4 Resumen de la zafra 2013 – 2014.

Técnico Económico	Plan	Real	%	Dif.
Toneladas de caña molida total	203023.2	234974.72	116	31951.52
Autoabastecimiento energía (%)	105	101	96	-4.39
Energía generada (kWh)	6109342.7	7424275		
Consumo al SEN (kWh)	587436.8	1025576		
Entrega energía al exterior (kWh)		44133		
Entrega al SEN por cogeneración (kWh)	657929.22	1070927		
Toneladas bagazo vendido		7745.53		
Generación propia horario pico (kWh)	1163115.7	1382334		
Consumo SEN horario pico (kWh)	111838.05	137966		
Entrega SEN en horario pico por cogeneración (kWh)	125258.62	205487		
Demanda máxima empresa en horario pico (kWh)		233060		

La cantidad de caña molida fue 234974.72 toneladas el 116 % del plan, la producción total de energía corresponde a 7424275 kWh con un promedio de 93.49 toneladas de caña molida por hora.

En la zafra 2015 – 2016 comenzó en diciembre y culminó en abril con una duración de 111 días (Tabla. 5).

Tabla. 5 Resumen de la zafra 2015 – 2016.

Técnico Económico	Plan	Real	%	Dif.
Toneladas de caña a moler total	246605.86	153063.27	62	-93542.6
Autoabastecimiento Energía (%)	101.69	106	103.77	3.83
Energía generada (kWh)	4964806.37	4928947.2		
Entrega total (kWh)	656882.07	650790		
Consumo total (kWh)	305526.55	392728		
Toneladas bagazo vendido		0		

La cantidad de caña molida fue 153063.27 toneladas el 62 % del plan, la producción total de energía corresponde a 4928947.2 kWh con un promedio de 98.82 toneladas de caña molida por hora.

La zafra 2018 – 2019 actualmente en progreso comenzó en diciembre y hasta la fecha 17 marzo cumple con 107 días (Tabla. 6).

Tabla. 6 Resumen de la zafra 2018 – 2019.

Técnico Económico	Plan	Real	%	Dif.
Toneladas de caña a moler total	209862	137004.93	65.28	-72857.1
Autoabastecimiento Energía (%)	105	107	101.96	2.05
Energía generada (kWh)	4077153.86	10900013.76		
Entrega total (kWh)	514348.6408	604950		
Consumo total (kWh)	338717.3976	395781		
Toneladas bagazo vendido		0		

La cantidad de caña molida hasta el 17 marzo es 137004.93 toneladas el 65.28 % del plan, la producción total de energía corresponde a 10900013.76 kWh con un promedio de 98.64 toneladas de caña molida por hora.

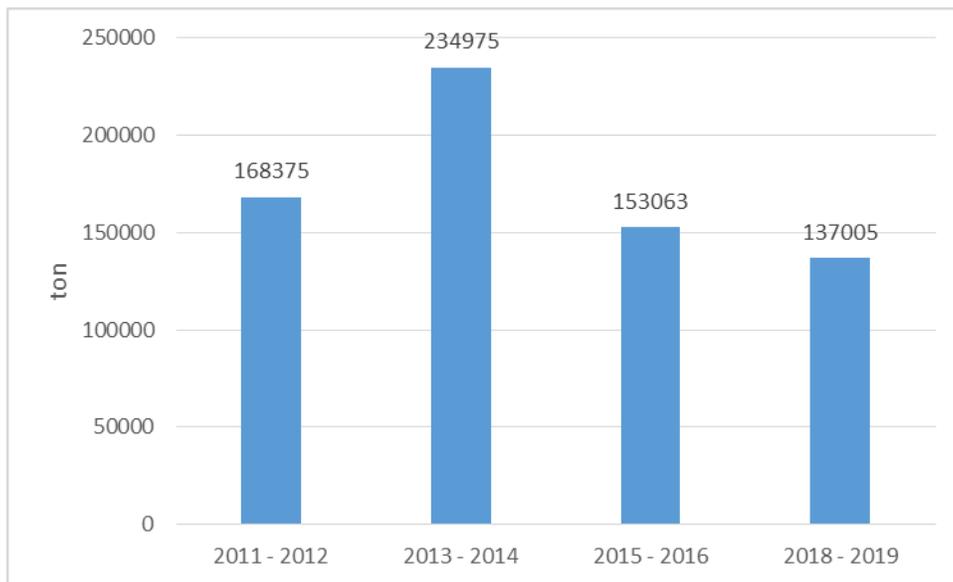


Gráfico. 1. Caña molida en las zafras.

Como resultado del análisis estadístico de la muestra de zafras analizadas se nota en la gráfica 1 como varía la cantidad de caña molida teniendo un pico en la zafra 2013 – 2014 con 234975 toneladas de caña molida, pero presenta una gradual decadencia en las zafras posteriores al no lograr el cumplimiento del plan de zafra anual por distintas condiciones como naturales, abastecimiento de caña o roturas en la industria.

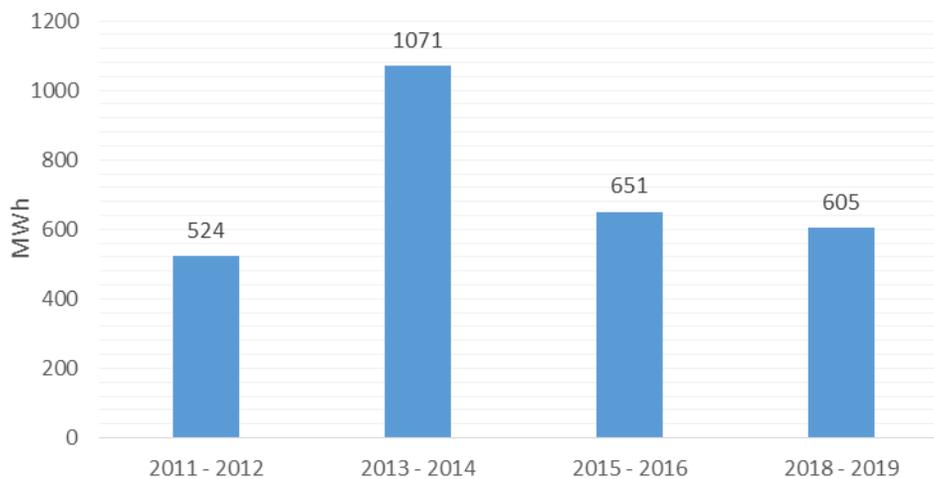


Gráfico. 2. Generación de electricidad en las zafras.

En la gráfica 2 se evidencia el cumplimiento de las políticas de desarrollo sostenibles que despliega el país logrando producir el máximo de electricidad posible para autoabastecerse.

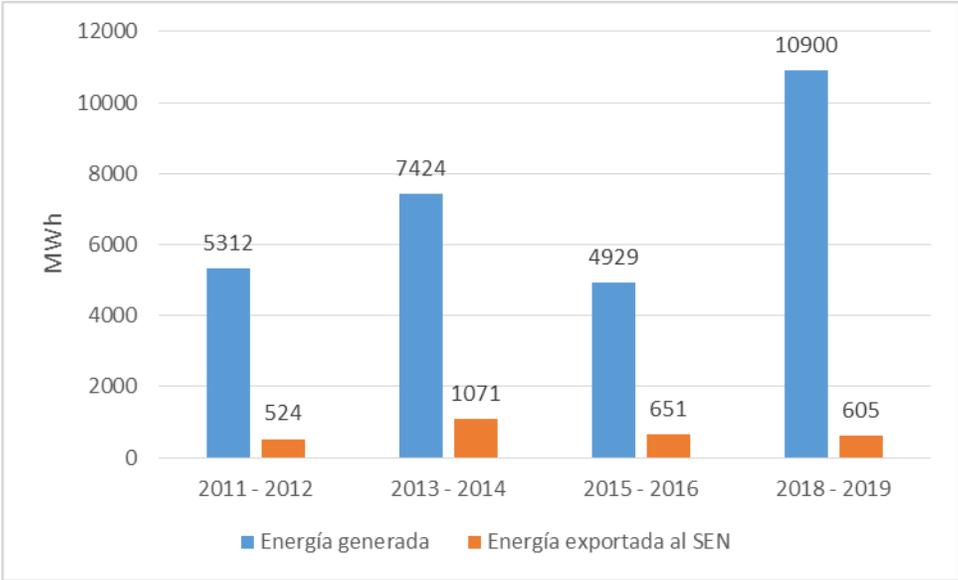


Gráfico. 3. Generación de electricidad y exportación al SEN.

A pesar de que en la zafra 2018 – 2019 se generó cerca de 10,900 MW solo se exporta al SEN 605 MW el 5.55 % de la energía generada debido a baja eficiencia de trabajo, mientras que en el período de zafra 2013 – 2014 se generó 7,424 MW y se exportó 1,070 MW el 14.43 % al SEN, los 605 MW exportados en la zafra 2018 – 2019 representa el 56.49 % del máximo valor exportado al SEN en las zafras analizadas.

Como resultado final de los datos analizados de las zafras de muestra se obtiene un aprovechamiento de la capacidad de molida 96.78 toneladas por hora.

2.3. Balance energético esquema actual central Carlos Baliño.

A partir del esquema actual (Figura 4) y de los datos tomados en el central azucarero Carlos Baliño, teniendo que el proceso presenta un consumo de vapor promedio de 0.48 toneladas por toneladas de caña molida el cual está dentro del consumo de vapor típico en el proceso de los centrales azucareros 0.35 a 0.55 y el

aprovechamiento de la capacidad de caña de azúcar molida es de 96.78 toneladas por hora, se obtiene 46.45 toneladas de vapor por hora, y los valores de trabajo del esquema actual representados en la tabla 3.

$$\text{Demanda de vapor} = 96.78 * 0.48 \quad (5)$$

$$\text{Demanda de vapor} = 46.45 \text{ tonv/h}$$

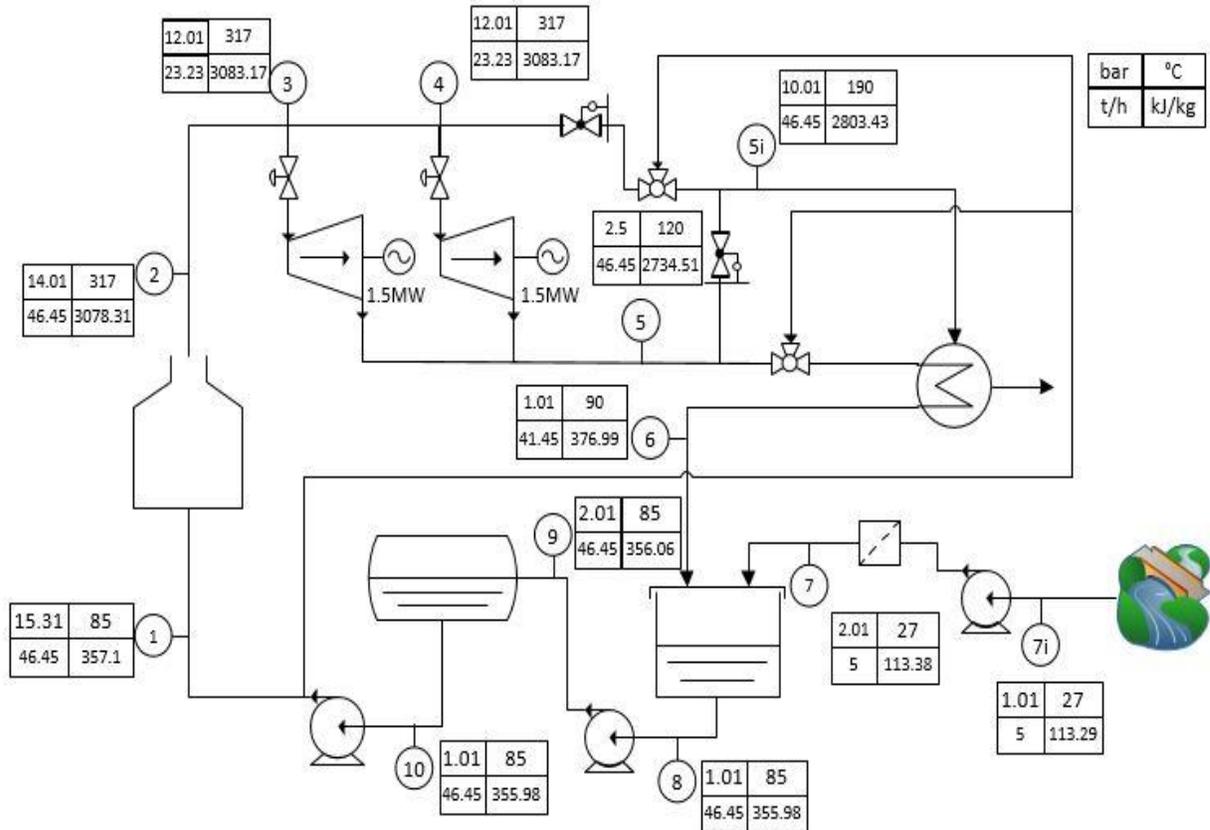


Figura 4. Datos de trabajo esquema actual.

Tabla 3. Datos del esquema actual.

Puntos	Flujo (tonv/h)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	46.45	15.31	85	357.1
2	46.45	14.01	317	3078.31
3	23.23	12.01	317	3083.17
4	23.23	12.01	317	3083.17
5	46.45	2.5	120	2734.51
5i	46.45	10.01	190	2803.43
6	41.45	1.01	90	376.99
7	5	2.01	27	113.38
7i	5	1.01	27	113.29
8	46.45	1.01	85	355.98
9	46.45	2.01	85	356.06
10	46.45	1.01	85	355.98

Para realizar el cálculo del trabajo ideal de cada turbogenerador se toman los valores de la tabla 4.

Tabla 4. Datos necesarios en el turbogenerador.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entrada	h_3 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	6.45

$$Q_{sum} = \dot{m}_3 * (h_3 - h_5) \quad (6)$$

$$Q_{sum} = 2249.59 \text{ kW}$$

El trabajo ideal de cada turbogenerador es 2,249.59 kW.

La potencia generada por los turbogeneradores se calcula a partir de la tabla 5.

Tabla 5. Datos necesarios de los turbogeneradores.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entrada	h_3 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	6.45
Eficiencia isentrópica	η (%)	65

$$W_{gener} = \dot{m}_3 (h_3 - h_5) * \eta \quad (7)$$

$$W_{gener1} = 1462.23 \text{ kW}$$

$$W_{gener2} = 1462.23 \text{ kW}$$

Cada turbogenerador genera una potencia de 1.46 MW

El trabajo consumido por las bombas del agua de reposición, bomba número 2 y la bomba número 3 se determina partiendo de los datos de la tabla 6, 7, 8 respectivamente.

Tabla 6. Datos necesarios de la bomba del agua reposición.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_7 (bar)	2.01
Presión a la entrada	P_{7i} (bar)	1.01
Volumen	v_{7i} (m ³ /kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_{7i} (Kg/s)	1.39
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb1} = \dot{m}_{7i} v_{7i} (P_7 - P_{7i}) * 100/\eta \quad (8)$$

$$W_{consbomb1} = 0.18 \text{ kW}$$

Tabla 7. Datos necesarios de la bomba número 2.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_9 (bar)	2.01
Presión a la entrada	P_8 (bar)	1.01
Volumen	v_8 (m ³ /kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_8 (Kg/s)	12.9
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb2} = \dot{m}_8 v_8 (P_9 - P_8) * 100/\eta \quad (9)$$

$$W_{consbomb2} = 1.71 \text{ kW}$$

Tabla 8. Datos necesarios de la bomba número 3.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_1 (bar)	15.31
Presión a la entrada	P_{10} (bar)	1.01
Volumen	v_{10} (m ³ /kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_{10} (Kg/s)	12.9
Eficiencia de la bomba	H (%)	78

$$W_{consbomb3} = \dot{m}_{10} v_{10} (P_1 - P_{10})/\eta \quad (10)$$

$$W_{consbomb3} = 24.42 \text{ kW}$$

El trabajo total consumido es igual:

$$W_{constotal} = W_{consbomb1} + W_{consbomb2} + W_{consbomb3} \quad (11)$$

$$W_{constotal} = 26.31 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el trabajo neto es:

$$W_{neto} = W_{gener} - W_{constotal} \quad (12)$$

$$W_{neto} = 2898.16 \text{ kW}$$

Para determinar el calor consumido en proceso se toman los valores de la tabla 9.

Tabla 9. Datos del proceso.

Variable	Designación	Magnitud
Caña molida	CM (kgcm/s)	26.88
índice de consumo de vapor	ICM (kgv/kgcm)	0.48
% pérdidas en el proceso	X (%)	11
Entalpía a la entrada	h ₅ (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la salida	h ₆ (kJ/kg)	376.99

$$Q_{cons} = CM * ICV * \Delta h - P \quad (13)$$

$$Q_{cons} = 27075.04 \text{ kW}$$

$$P = x * CM * ICV \Delta h \quad (14)$$

$$P = 3346.35 \text{ kW}$$

El valor característico según la literatura de pérdidas de calor en el proceso de fabricación de azúcar principalmente en los intercambiadores de calor ronda entre 4 % y 8 % (Hugot, 1986), mientras que las pérdidas en el transporte de vapor son 3 % (Bartens, 2007). En el caso del central azucarero Carlos Baliño debido al mal estado y deterioro de sus componentes se estima un por ciento de pérdidas total del 11 %.

La eficiencia del generador de vapor se obtiene a partir de la ecuación 15 y los datos de la tabla 10:

Tabla 10. Datos para determinar la eficiencia de la caldera.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_2 (kJ/kg)	3078.31
Entalpía a la entrada	h_1 (kJ/kg)	357.1
Flujo	\dot{m}_2 (Kg/s)	12.9
Poder calórico inferior bagazo	PCI (kJ/kg)	7640
Eficiencia caldera	\dot{m}_{bagazo} (Kg/s)	5.81

$$\eta = \frac{\dot{m}_2 * (h_2 - h_1)}{\dot{m}_{\text{bagazo}} * \text{PCI}} \quad (15)$$

$$\eta = 79.05 \%$$

Para determinar el factor de utilización de la planta de cogeneración se toman los valores de la tabla 11 mediante la ecuación 16:

Tabla 11. Datos para determinar el factor de utilización.

Variable	Designación	Magnitud
Trabajo neto	W_{neto} (kJ/kg)	2898.16
Calor de proceso entregado	Q_{proceso} (kJ/kg)	27075.04
Entrada total de calor	Q_{entrada} (Kg/s)	35114.44

$$\varepsilon_u = \frac{W_{\text{neto}} + Q_{\text{proceso}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (16)$$

$$\varepsilon_u = 85.36 \%$$

Tabla 12. Resultados esquema actual.

Parámetros	Unidad	Valor
Capacidad de molienda	ton/h	96.78
Índice de consumo de vapor	$\text{ton}_{\text{vapor}}/\text{ton}_{\text{caña molida}}$	0.48
Generación de vapor	$\text{ton}_{\text{vapor}}/\text{h}$	46.45
Cantidad de bagazo disponible	$\text{ton}_{\text{bagazo}}/\text{h}$	29.03
Potencia generada	kW	2924.47
Potencia neta	KW	2898.16
Consumo de bagazo	ton/h	20.93
Factor de utilización	%	85.36
Sobrante de bagazo	$\text{ton}_{\text{bagazo}}/\text{h}$	8.11

En el esquema actual se dispone de 29.03 ton_{bagazo}/h del cual se consume 20.93 ton_{bagazo}/h en la generación de vapor por lo que se dispone de 8.11 ton_{bagazo}/h, se cuenta con una potencia neta de 2.92 MW y un 85.36 % factor de utilización de cogeneración.

2.4. Balance energético del escenario 1.

El cálculo del balance energía (figura 5) parte de los datos tomados en el esquema actual con la diferencia que presenta un deaireador (figura 6) para aumentar los parámetros a la entrada de la caldera, por lo que se instala un generador de 2 MW en uno de los turbos, ya que cuenta con un reductor que admite hasta 3 MW de potencia. El proceso presenta un consumo de vapor promedio de 0.48 toneladas por toneladas de caña molida el cual está dentro del consumo de vapor típico en el proceso de los centrales azucareros 0.35 a 0.55 y un aprovechamiento de la capacidad de molida 96.78 toneladas por hora, se obtiene 50.03 toneladas de vapor por hora, y los valores de trabajo del esquema actual representados en la tabla 13.

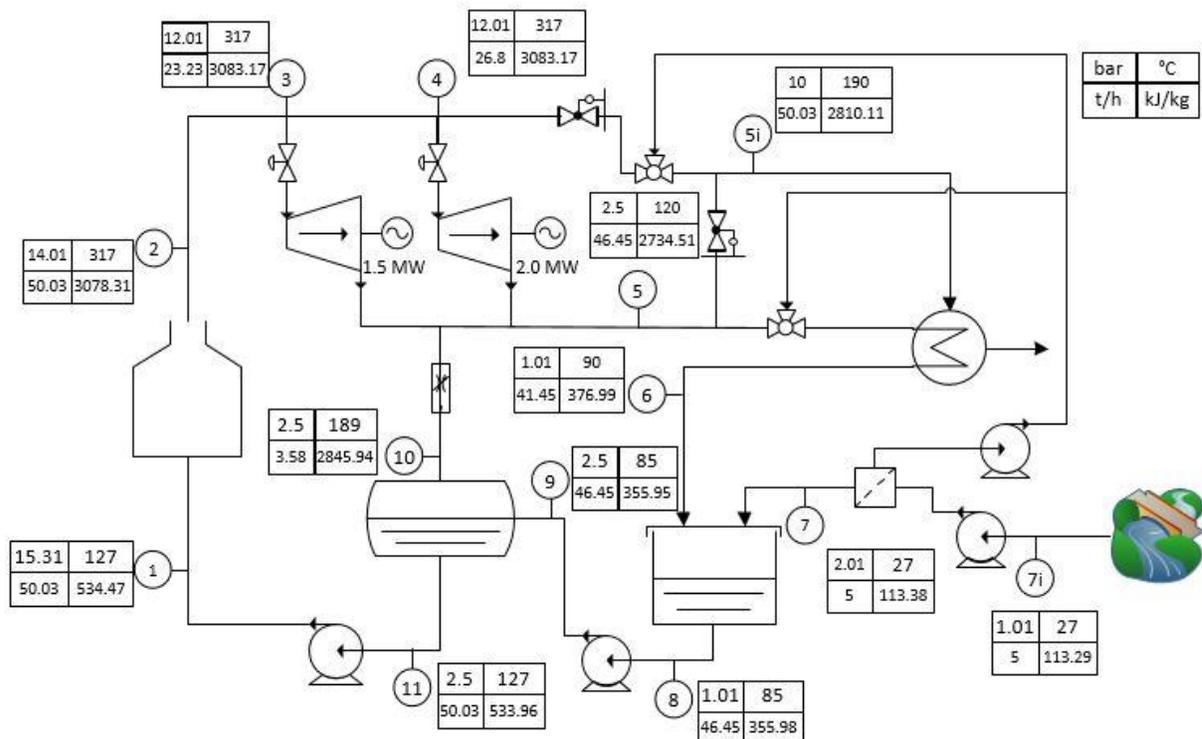


Figura 5. Datos de trabajo escenario 1.

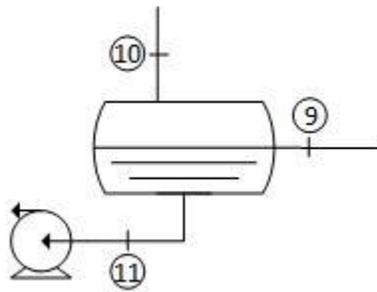


Figura 6. Deaerador presurizado.

Al presurizar el deaerador se necesita un aumento del flujo de vapor para lograr aumentar la temperatura en el punto 11 y así elevar los parámetros a la entrada del generador de vapor, por lo que se tuvo que hacer un balance de masa y energía cuyos datos se reflejan en la tabla 14.

Tabla 14. Balance masa y energía deaerador.

Parámetros	9	10	11
Flujo de vapor (t/h)	46.45	3.58	50.03
Presión (bar)	2.5	2.5	2.5
Temperatura (°C)	85	188.95	127.1
Temperatura saturación	127.46	127.46	127.46
Entalpía (kJ/kg)	355.95	2845.94	533.96
Entropía (kJ/kgK)	1.13	7.35	1.6
Calidad	0	1	0

Tabla 13. Datos del escenario 1.

Puntos	Flujo (tonv/h)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	50.03	15.31	85	534.47
2	50.03	14.01	317	3078.31
3	23.23	12.01	317	3083.17
4	26.8	12.01	317	3083.17
5	46.45	2.5	120	2734.51
5i	50.03	10.01	190	2803.43
6	41.45	1.01	90	376.09
7	5	2.01	27	113.38
7i	5	1.01	27	113.29
8	46.45	1.01	85	355.98
9	46.45	2.5	85	355.95
10	3.58	2.5	189	2845.94
11	50.03	2.5	127	533.96

A partir de la ecuación 6 se calcula trabajo ideal del turbogenerador de 1.5 MW, tomando los valores de la tabla 15.

Tabla 15. Datos necesarios en el turbogenerador de 1.5 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entrada	h_3 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	6.45

$$Q_{sum} = 2249.86 \text{ kW}$$

En el turbogenerador de 2.0 MW se utiliza la ecuación 17 y los datos de la tabla 16 para determina el trabajo ideal.

Tabla 16. Datos necesarios en el turbogenerador de 1.5 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entrada	h_4 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_4 (Kg/s)	7.44

$$Q_{sum} = \dot{m}_4 * (h_4 - h_5) \quad (17)$$

$$Q_{sum} = 2595.75 \text{ kW}$$

La potencia generada por el turbogenerador de 1.5 MW se calcula a partir de la ecuación 7 y los datos de la tabla 17.

Tabla 17. Datos del turbogenerador 1.5 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entada	h_3 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	6.45
Eficiencia de los turbogeneradores	η (%)	65

$$W_{gener1} = 1462.41 \text{ kW}$$

El turbogenerador de 1.5 MW genera una potencia de 1.46 MW.

En el turbogenerador de 2.0 MW la potencia generada se calcula a partir de la ecuación 18 y los datos de la tabla 18.

Tabla 18. Datos del turbogenerador 2.0 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la entrada	h_4 (kJ/kg)	3083.17
Flujo de vapor	\dot{m}_4 (Kg/s)	7.44
Eficiencia de los turbogeneradores	η (%)	65

$$W_{gener} = \dot{m}_4 (h_4 - h_5) * \eta \quad (18)$$

$$W_{gener2} = 1687.23 \text{ kW}$$

El trabajo generado por el turbogenerador de 2.0 MW es de 1.68 MW.

El trabajo consumido por las bombas del agua de reposición, bomba número 2 y la bomba número 3 se determina partiendo de los datos de la tabla 19, 20, 21 y las ecuaciones 8, 9, 10 respectivamente.

Tabla 19. Datos de la bomba del agua reposición.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_7 (bar)	2.01
Presión a la entrada	P_{7i} (bar)	1.01
Volumen	V_{7i} (m ³ *kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_{7i} (Kg/s)	1.39
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb1} = 0.18 \text{ kW}$$

Tabla 20. Datos de la bomba número 2.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_9 (bar)	2.5
Presión a la entrada	P_8 (bar)	2.01
Volumen	V_8 (m ³ *kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_8 (Kg/s)	12.9
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb2} = 2.54 \text{ kW}$$

Tabla 21. Datos de la bomba número 3.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P ₁ (bar)	15.31
Presión a la entrada	P ₁₁ (bar)	2.5
Volumen	V ₁₁ (m ³ /kg)	0.0011
Flujo	ṁ ₁₁ (Kg/s)	13.9
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb3} = 24.35 \text{ kW}$$

El trabajo total consumido se calcula mediante la ecuación 11:

$$W_{constotal} = 27.08 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el trabajo neto es:

$$W_{neto} = 3122.57 \text{ kW}$$

El calor consumido en proceso se calcula a través de la ecuación 13 y se toman los valores de la tabla 22.

Tabla 22. Datos del proceso.

Variable	Designación	Magnitud
Caña molida	CM (kgcm/s)	26.88
índice de consumo de vapor	ICM (kgv/kgcm)	0.48
% pérdidas en el proceso	x (%)	11
Entalpía a la entrada	h ₅ (kJ/kg)	2734.51
Entalpía a la salida	h ₆ (kJ/kg)	376.99

$$Q_{cons} = 27075.04 \text{ kW}$$

Los valores de pérdidas según la literatura se ha tomado un valor de 11 % igual que el esquema actual.

El flujo necesario de bagazo se obtiene a partir del despeje de la ecuación 15 y los datos de la tabla 23:

Tabla 23. Datos para determinar flujo de bagazo.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_2 (kJ/kg)	3078.31
Entalpía a la entrada	h_1 (kJ/kg)	534.47
Flujo	\dot{m}_2 (Kg/s)	13.9
Poder calórico inferior bagazo	PCI (kJ/kg)	7640
Eficiencia caldera	η (%)	79.03

$$\dot{m}_{bagazo} = \frac{\dot{m}_2 * (h_2 - h_1)}{\eta * PCI}$$

$$\dot{m}_{bagazo} = 21.1 \text{ ton/h}$$

Para determinar el factor de utilización de la planta de cogeneración se toman los valores de la tabla 24 por la ecuación 16:

Tabla 24. Datos para determinar el factor de utilización.

Variable	Designación	Magnitud
Trabajo neto	W_{neto} (kJ/kg)	3122.57
Calor de proceso entregado	$Q_{proceso}$ (kJ/kg)	27075.04
Entrada total de calor	$Q_{entrada}$ (Kg/s)	35353.25

$$\varepsilon_u = 85.42 \%$$

Tabla 25. Resultados del escenario 1.

Parámetros	Unidad	Valor
Capacidad de molida	ton/h	96.78
Índice de consumo de vapor	$\text{ton}_{vapor}/\text{ton}_{caña \text{ molida}}$	0.48
Generación de vapor	$\text{ton}_{vapor}/\text{h}$	50.03
Cantidad de bagazo disponible	$\text{ton}_{bagazo}/\text{h}$	29.03
Potencia generada	kW	3149.64
Potencia neta	KW	3122.57
Consumo de bagazo	ton/h	21.1
Factor de utilización	%	85.42
Sobrante de bagazo	$\text{ton}_{bagazo}/\text{h}$	7.94

En el escenario 1 con la incorporación del deaireador y un generador de 2 MW se cuenta con 29.03 ton_{bagazo}/h del cual se consume 21.1 ton_{bagazo}/h en la generación de vapor por lo que se dispone de 7.94 ton_{bagazo}/h, se cuenta con una potencia neta de 3.12 MW y un factor de utilización de cogeneración de 85.42 %.

2.5. Balance energético del escenario 2.

El balance de energía (figura 7) parte de los datos tomados en el esquema actual junto al deaireador (figura 8) para continuar con el aumento de los parámetros a la entrada de la caldera, además se instala una turbina de contrapresión de tecnología alemana (figura 9) de hasta 10 MW que sustituye las dos turbinas de contrapresión existentes (Siemens, 2017) y de un nuevo generador de vapor que genera a 65 bar y 510 °C. El proceso mantiene un consumo de vapor de 0.48 toneladas por toneladas de caña molida el cual está dentro del consumo de vapor típico en el proceso de los centrales azucareros 0.35 a 0.55 y un aprovechamiento de la capacidad de molida de 96.78 toneladas por hora, se obtiene 50.03 toneladas de vapor por hora, y los valores de trabajo del esquema actual representados en la tabla 26.

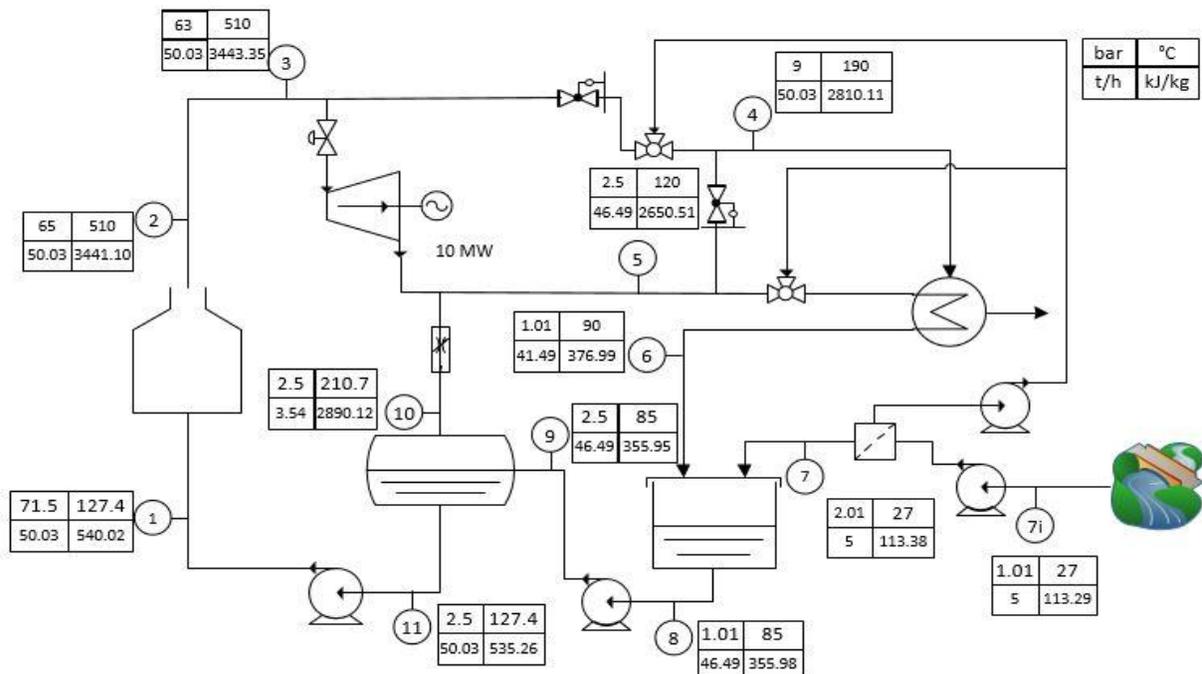


Figura 7. Datos de trabajo escenario 2.

Tabla 26. Datos del escenario 2.

Puntos	Flujo (tonv/h)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)
1	50.03	71.5	127.4	540.02
2	50.03	65	510	3441.1
3	50.03	63	510	3443.35
4	50.03	9	190	2810.11
5	46.49	2.5	120	2650.51
6	41.49	1.01	90	376.99
7	5	2.01	27	113.38
7i	5	1.01	27	113.29
8	46.49	1.01	85	355.98
9	46.49	2.5	85	355.95
10	3.54	2.5	210.7	2890.12
11	50.03	2.5	127.4	535.26

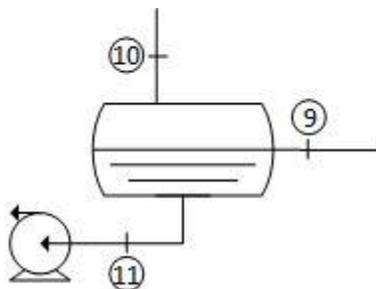


Figura 8. Deaerador presurizado escenario 2.

Al presurizar el deaerador se necesita un aumento del flujo de vapor para lograr aumentar la temperatura en el punto 11 y así elevar los parámetros a la entrada del generador de vapor, por lo que se tuvo que hacer un balance de masa y energía cuyos datos se reflejan en la tabla 27.

Tabla 27. Balance masa y energía deaerador.

Parámetros	9	10	11
Flujo de vapor (t/h)	46.49	3.54	50.03
Presión (bar)	2.5	2.5	2.5
Temperatura(°C)	85	210.71	127.41
Temperatura saturación	127.46	127.46	127.46
Entalpía (kJ/kg)	355.95	2890.12	535.26
Entropía (kJ/kgK)	1.13	7.45	1.61
Calidad	0	1	0

Tabla 28. Datos turbogenerador.

Modelo	SST-120
Fabricante	Siemens AG
Tecnología	Alemana
Potencia entregada	hasta 10 MW
Presión de entrada	hasta 131 bar
Temperatura de entrada	hasta 530 °C
Velocidad	según la máquina accionada
Longitud	9 metros incluido generador
Ancho	2.8 metros
Altura	3.2 metros
Arranque	Rápido sin precalentamiento
Eficiencia	85 %

A partir de la ecuación 6 se calcula el trabajo ideal del turbogenerador de 10 MW, tomando los valores de la tabla 29.

Tabla 29. Dato del turbogenerador de 10 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2650.51
Entalpía a la entrada	h_3 (kJ/kg)	3443.35
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	13.9

$$Q_{sum} = 11018.23 \text{ kW}$$

La potencia generada por el turbogenerador de 10 MW se calcula a partir de la ecuación 7 y los datos de la tabla 30.

Tabla 30. Dato del turbogenerador 10 MW.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h_5 (kJ/kg)	2650.51
Entalpía a la entrada	h_3 (kJ/kg)	3443.35
Flujo de vapor	\dot{m}_3 (Kg/s)	13.9
Eficiencia de los turbogeneradores	η (%)	85

$$W_{gener} = 9365.49 \text{ kW}$$

El turbogenerador genera una potencia de 9.37 MW.

El trabajo consumido por las bombas del agua de reposición, bomba número 2 y la bomba número 3 se determina partiendo de los datos de la tabla 31, 32, 33 y las ecuaciones 8, 9, 10 respectivamente.

Tabla 31. Datos de la bomba del agua reposición.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_7 (bar)	2.01
Presión a la entrada	P_{7i} (bar)	1.01
Volumen	V_{7i} (m ³ *kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_{7i} (Kg/s)	1.39
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb1} = 0.18 \text{ kW}$$

Tabla 32. Datos de la bomba número 2.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_9 (bar)	2.5
Presión a la entrada	P_8 (bar)	1.01
Volumen	V_8 (m ³ *kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_8 (Kg/s)	12.91
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb2} = 2.55 \text{ kW}$$

Tabla 33. Datos de la bomba número 3.

Variable	Designación	Magnitud
Presión a la salida	P_1 (bar)	71.5
Presión a la entrada	P_{11} (bar)	2.5
Volumen	V_{11} (m ³ *kg)	0.0011
Flujo	\dot{m}_{11} (Kg/s)	13.9
Eficiencia de la bomba	η (%)	78

$$W_{consbomb3} = 131.2 \text{ kW}$$

El trabajo total consumido se calcula mediante la ecuación 11:

$$W_{constotal} = 133.92 \text{ kW}$$

Por lo tanto, el trabajo neto es:

$$W_{neto} = 9231.57 \text{ kW}$$

El calor consumido en proceso se obtiene por la ecuación 13 y se toman los valores de la tabla 34.

Tabla 34. Datos del proceso.

Variable	Designación	Magnitud
Caña molida	CM (kgcm/s)	26.88
Índice de consumo de vapor	ICM (kgv/kgcm)	0.48
% pérdidas en el proceso	x (%)	11
Entalpía a la entrada	h ₅ (kJ/kg)	2650.51
Entalpía a la salida	h ₆ (kJ/kg)	376.99

$$Q_{cons} = 26110.35 \text{ kW}$$

Los valores de pérdidas según la literatura se ha tomado un valor de 11 % igual que el esquema actual.

El flujo necesario de bagazo se obtiene a partir del despeje de la ecuación 15 y los datos de la tabla 35 con una eficiencia del 86 % (Konrad Burin, 2015):

Tabla 35. Datos para determinar flujo de bagazo.

Variable	Designación	Magnitud
Entalpía a la salida	h ₂ (kJ/kg)	3441.1
Entalpía a la entada	h ₁ (kJ/kg)	540.02
Flujo	ṁ ₂ (Kg/s)	13.9
Poder calórico inferior bagazo	PCI (kJ/kg)	7640
Eficiencia de la caldera	η (%)	86

$$\dot{m}_{bag} = \frac{\dot{m}_2 * (h_2 - h_1)}{\eta * PCI}$$

$$\dot{m}_{bag} = 22.1 \text{ ton/h}$$

Para determinar el factor de utilización de la planta de cogeneración se toman los valores de la tabla 36 por la ecuación 16:

Tabla 36. Datos para determinar el factor de utilización.

Variable	Designación	Magnitud
Trabajo neto	Wneto(kJ/kg)	9231.57
Calor de proceso entregado	Qproceso(kJ/kg)	26110.35
Entrada total de calor	Qentrada(Kg/s)	40317.96

$$\varepsilon_u = 87.66 \%$$

Tabla 37. Resultados del escenario 2.

Parámetros	Unidad	Valor
Capacidad de molida	ton/h	96.78
Índice de consumo de vapor	ton _{vapor} /ton _{caña molida}	0.48
Generación de vapor	ton _{vapor} /h	50.03
Cantidad de bagazo disponible	ton _{bagazo} /h	29.03
Potencia generada	kW	9365.49
Potencia neta	KW	9231.57
Consumo de bagazo	ton/h	22.1
Factor de utilización	%	87.66
Sobrante de bagazo	ton _{bagazo} /h	6.93

En el escenario 2 con la incorporación del deaireador, una nueva caldera que propicia 65 bar, 510 °C, eficiencia del 86 % y una turbina de contrapresión de 10 MW con una eficiencia del 85 %, se tiene 29.03 ton_{bagazo}/h del cual se consume 22.1 ton_{bagazo}/h en la generación de vapor por lo que se dispone de 6.93 ton_{bagazo}/h, se genera una potencia neta de 9.23 MW y un factor de utilización de cogeneración de 87.66 %.

Conclusiones Parciales:

1. El índice de consumo de vapor en el central azucarero Carlos Baliño es de 0.48 toneladas de vapor por toneladas de caña molida, valor mejorable, aunque está dentro del rango de 0.35 – 0.55 para centrales azucareros de acuerdo con la bibliografía.
2. La cantidad de bagazo que se obtiene para un aprovechamiento de la capacidad de caña molida de 96.78 ton_{caña molida}/h es 29.03 ton_{bagazo}/h cuyo valor satisface la demanda para los escenarios propuestos.
3. La instalación del deaireador y el generador de 2 MW en el escenario 1 implica que se genere 3.58 ton_{vapor}/h más que el esquema actual, logrando generar una potencia de 3,122.57 kW mejorando por 224 kW, se logra un factor de utilización de cogeneración de 85.42 %.
4. La instalación del deaireador, la caldera y el turbogenerador de 10 MW logra generar una potencia de 9,231.57 kW mejorando por 6,333 kW la generación actual y por 6,109 kW la generación del escenario 1, logrando un factor de utilización cogeneración de 87.66 %.

Capítulo 3. Análisis de resultados.

En el presente capítulo se realiza el análisis de factibilidad económica y ambiental de las soluciones propuestas mediante el uso de indicadores económicos, como el costo nivelado de la energía generada, costo de inversión, VAN y TIR, e indicadores ambientales como las emisiones evitadas de CO₂, y el análisis de resultados de los esquemas de mejoras propuestos a la UEB Carlos Baliño.

Para determinar el costo final del equipo primeramente se debe conocer:

- Costo de adquisición.
- Costo de Instalación.
- Costo de mantenimiento.

Según (Perry, 1999) el costo de instalación del equipo varía con el tipo y el tamaño, pero generalmente varía en un rango de 0.4 a 1.2 veces el costo del equipo y se calcularía por la ecuación 19.

$$\text{costo instalación} = \text{costo adquisición} * \text{factor de costo de instalación} \quad (19)$$

El costo de adquisición se determina a partir de la actualización del costo al presente mediante los índice de costo a través de la ecuación 20.(Peters, 2002)

$$\text{costo presente} = \text{costo original} * \frac{\text{el valor del índice en la actualidad}}{\text{valor índice momento que costo original fue obtenido}} \quad (20)$$

Los costos estimados de mantenimiento son basados en bases de datos de compañías con procesos similares. Un valor promedio del costo de mantenimiento anual es un 4 % del costo capital de la planta (adquisición + Instalación). Este porcentaje puede variar de un 2 % al 10 %, dependiendo de la severidad de la operación de la planta. Aproximadamente la mitad del costo de mantenimiento es para materiales y el resto para mano de obra.(Herrera Moya, 2007)

Premisas:

- 150 días de zafra.
- 19 horas al día.
- Precio de la energía vendida al SEN 0.15 USD/kWh.
- Precio del bagazo 7.11 USD/ton.

3.1. Análisis de factibilidad económica y ambiental del escenario 1.

En el escenario 1 se incurren gastos monetarios de inversión en la presurización del deaireador y la incorporación del generador de 2 MW al esquema energético (tabla 38).

Tabla 38. Costos adquisición, instalación y mantenimiento.

Variable	Unidad	Deaireador	Generador 2 MW
Costo adquisición	USD	100000	132731.56
Costo Instalación	USD	50000	66365.78
Costo de mantenimiento	USD/año	6000	7963.89

El costo adquisición del deaireador tiene un valor de 100,000 USD, para el generador de 2 MW el costo se calcula por la ecuación 20, con un valor de 80,000 USD en 2002 y un índice de costo 390.4 (Peters, 2002), junto a el índice de costo para el 2019 en la industria química 647.73 que sería 7.4 % mayor el valor 603.1 en 2018. (Jenkins, 2019)

costo presente = 132,731.56 USD

El costo final de adquisición del generador de 2 MW es 132,731.56 USD, el costo de instalación del deaireador se determina mediante la ecuación 19 para un factor de instalación de 0.5 por su sencilla instalación y presencia de mano de obra cualificada, tiene un valor de 50,000 USD, el costo de mantenimiento tiene un valor de 6,000 USD/año para un 4 % del costo capital debido a la facilidad de

operación y presencia de mano de obra cualificada. Por otra parte, la instalación del generador de 2 MW para el mismo factor de 0.5 tiene un valor de 66,365.78 USD y el costo de mantenimiento para un 4 % del costo capital es 7,963.89 USD/año.

El costo fijo de inversión del asciende a 349,097.34 USD, los costos de mantenimiento del esquema actual es 477,862 USD/año sumado a los costos de mantenimiento del deaireador y el generador de 2 MW, el costo de mantenimiento general es 491,826 USD/año.

Para determinar los ingresos provenientes de la energía eléctrica vendida al SEN se realizó un análisis del consumo de energía propia del central en distintas zafras, los valores de la correlación entre el flujo de masa de la caña y el consumo de electricidad para los parámetros del sistema actuales se muestran en el gráfico 4. La generación de potencia que se determinó es 19.109 kWh/ton_{caña}, y la demanda de electricidad 886.82 kW con un error cuadrado de 0.8406. (Rosenberg, 2019)

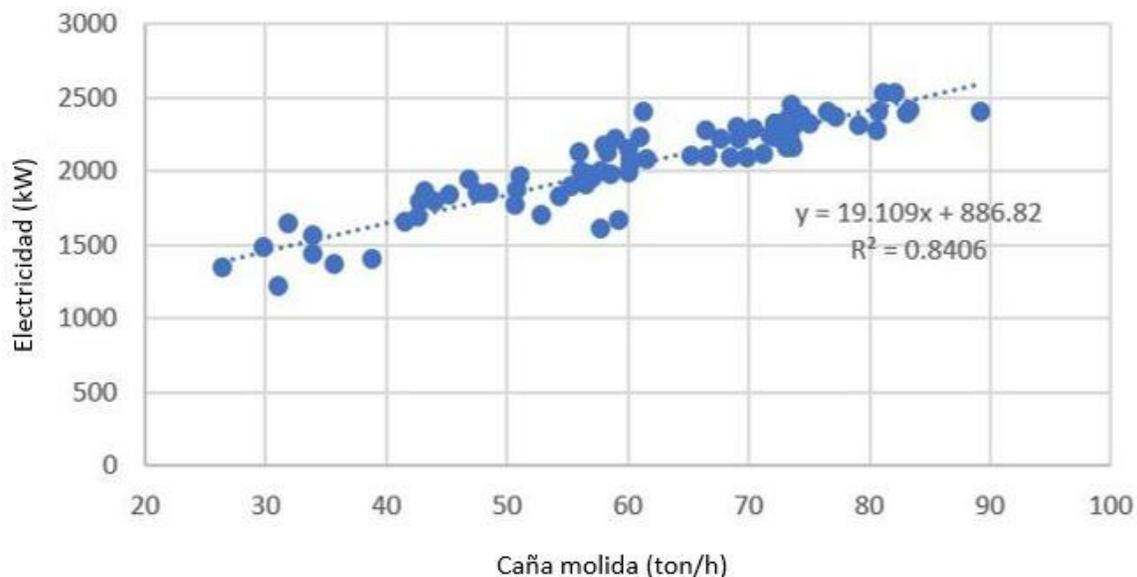


Gráfico. 4. Correlación entre caña molida y energía eléctrica consumida.

Los ingresos (tabla 39) se calculan por las ecuaciones 21 y 22 para 150 días/año y 19 h/día, el precio de venta de la electricidad es 0.15 USD/kWh, una tonelada de

bagazo cerca de 7.11 USD, la potencia generada es 3,122.57 kW, para la máxima capacidad de molienda el central tiene un consumo propio de 2,736.19 kW por lo que dispone de una potencia de 386.38 kW y un sobrante de bagazo de 7.94 ton/h.

$$\text{Venta energía eléctrica} = \frac{\text{día}}{\text{año}} * \frac{\text{h}}{\text{día}} * \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} * W_{\text{disp}} \quad (21)$$

$$\text{Venta energía eléctrica} = 150 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 19 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 0.15 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} * 386.38 \text{ kW}$$

$$\text{Venta energía eléctrica} = 165,177.45 \text{ USD/año}$$

$$\text{Venta de Bagazo} = \frac{\text{día}}{\text{año}} * \frac{\text{h}}{\text{día}} * \frac{\text{USD}}{\text{ton}} * \text{Bagazo sobrante} \quad (22)$$

$$\text{Venta de Bagazo} = 150 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 19 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 7.11 \frac{\text{USD}}{\text{ton}} * 7.94 \text{ ton/h}$$

$$\text{Venta de Bagazo} = 160,892.19 \text{ USD/año}$$

Tabla 39. Ingresos anuales.

Producto	Unidad	Valor
Energía eléctrica vendida SEN	USD/año	165177.45
Bagazo	USD/año	160892.19
Ingresos totales	USD/año	326069.64

La instalación del deaireador y el nuevo generador de 2 MW se logra 165,177.45 USD/año en la venta de energía eléctrica al SEN y 160,892.19 USD/año en la venta de bagazo a bioeléctricas, los ingresos totales son 326,069.64 USD/año.

En la tabla 40 se encuentra los costos de inversión (adquisición, instalación, mantenimiento) y los ingresos económicos anuales para poder determinar el VAN y la TIR, así como la vida útil del proyecto 20 años y la tasa de descuento 8 %, el 55 % del costo de mantenimiento anual del central se adjudican a las ventas de electricidad y bagazo.

Tabla 40. Costo inversión e ingresos anuales.

Variable	Unidad	Valor
Inversión total	USD	349097.34
Costo de mantenimiento	USD/año	270504
Ingresos totales	USD/año	326069.64
Vida útil del proyecto	año	20
Tasa de descuento	%	8

En el gráfico 5 se muestran los valores del VAN para cada año, el valor actual neto del proyecto (VAN) es 607,974.48 USD por lo que es rentable y se recuperaría la inversión a los 7 años, la tasa interna de retorno (TIR) es de hasta 11.64 %.

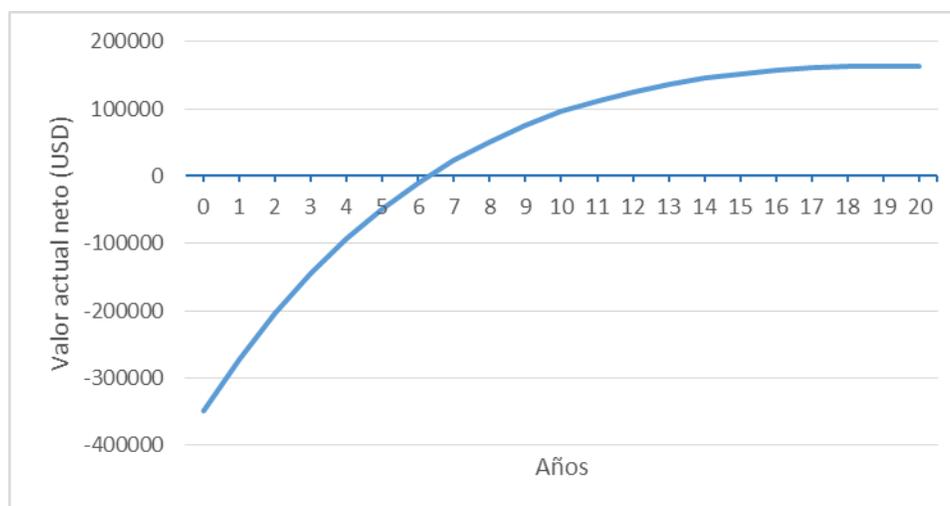


Gráfico. 5. Valor actual neto escenario 1.

La generación de electricidad a partir de biomasa tiende a cero las emisiones de CO₂ a la atmósfera, mediante el análisis del factor de conversión del combustible equivalente se obtiene los índices 0.273 ton_{comb}/MWh (UNEI, 2018) y 3.2 tonCO₂/ton_{comb} (Petroleum, 2019).

Con la instalación del deaireador y el generador de 2 MW se logra dejar de emitir 2.75 tonCO₂/h a la atmósfera y 0.86 toncomb/h ahorrado, para una zafra se evitaría 523 toneladas de CO₂ y 163 toneladas de combustible más que el esquema actual, lo que sería 7,843 tonCO₂/año y 2,451 ton_{comb}/año que según el

precio de la tonelada de petróleo 417.95 USD/ton(AzCuba, 2019) se ahorra al país 1,024,396 USD/año.

3.2. Análisis de factibilidad económica y ambiental del escenario 2.

En el escenario 2 se realizó inversión en la nueva caldera, en el turbogenerador y en instalar el deaireador. El costo de inversión de la instalación del deaireador tiene un valor de 100,000 USD.

Para determinar el costo del generador de vapor se tiene que en el año 2014 para una capacidad máxima de 55 ton/h y una presión y temperatura del vapor a la salida de 65 bar y 510 °C presenta un costo de 4,000,000 USD (Matches, 2014), dicho valor se actualiza al valor actual mediante los índices de costo por la ecuación 20.

costo presente caldera = 4,497,344.21 USD

El valor del índice de costo para la industria química en el transcurso del año es 7.4 % mayor el valor en 2018 que es 603.1(Jenkins, 2019), por lo que el valor del índice de costo en la actualidad es de 647.73, el índice de costo en el 2014 es de 576.1(CEPCI, 2014). El costo de la caldera en la actualidad es 4,497,344.21 USD, incluyendo el costo de importación que es cerca de un 12.7 % del costo de adquisición (Rosa Vila, 2019), el costo final de inversión de la caldera es 5,068,506.92 USD.

El turbogenerador de 10 MW tiene un costo en el 2002 de 890,000 USD, el costo en el presente se calcularía por la ecuación 20, el índice de costo en el 2002 es 390.4 (Peters, 2002) y en la actualidad 647.73.

costo presente turbogenerador = 1,476,638.58 USD

Incluyendo el 12.7 % de importación el costo del turbogenerador es 1,664,171.68 USD.

Los costos de adquisición, instalación y mantenimiento del escenario 2 se muestran en la tabla 41.

Tabla 41. Costos adquisición, instalación y mantenimiento.

Variable	Unidad	Deaireador	caldera	turbogenerador
Costo adquisición	USD	100000	5068506.93	1664171.68
Costo Instalación	USD	50000	2534253.47	832085.84
Costo de mantenimiento	USD/año	6000	304110.42	99850

El costo de inversión de la adquisición del deaireador es 100,000 USD, la caldera tiene un costo de adquisición de 5,068,506.93 USD y el turbogenerador 1,664,171.68 USD. El costo de instalación del deaireador es 50,000 USD, el costo de mantenimiento 6,000 USD/año. El costo de la instalación de la caldera se calcula por la ecuación 19 para un factor de 0.5 debido a la existencia de mano de obra calificada 2,534,253.47 USD y el costo de mantenimiento para un 4 % del costo capital es 304,110.42 USD/año, la instalación del turbogenerador se obtiene por la ecuación 19 para un factor igual al de la caldera de 0.5 es 832,085.84 USD y el costo de mantenimiento para un 4 % del costo capital es 99,850 USD/año.

El costo fijo de inversión del escenario 2 asciende a 10,249,018 USD, los costos de mantenimiento del esquema actual es 477,862 USD/año sumado a los costos de mantenimiento del deaireador, la caldera y el turbogenerador, el costo de mantenimiento general es 887,822 USD/año.

Los ingresos (tabla 42) se calculan por las ecuaciones 21 y 22 para 150 días/zafra y 19 h/día, el precio de venta de la electricidad es 0.15 USD/kWh, el de una tonelada de bagazo 7.11 USD, la potencia generada es 9,231.57 kW, para la máxima capacidad de molienda el central tiene un consumo propio de 2,736.19 kW de acuerdo al análisis de correlación por lo que dispone de una potencia de 6,495.38 kW y 6.93 ton_{bagazo}/h.

$$\text{Venta energía eléctrica} = 150 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 19 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 0.15 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} * 6495.38 \text{ kW}$$

$$\text{Venta energía eléctrica} = 2,776,774.95 \text{ USD/año}$$

$$\text{Venta de Bagazo} = 150 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 19 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 7.11 \frac{\text{USD}}{\text{ton}} * 6.93 \text{ ton/h}$$

$$\text{Venta de Bagazo} = 140,426.06 \text{ USD/año}$$

Tabla 42. Ingresos anuales.

Producto	Unidad	Valor
Energía eléctrica vendida SEN	USD/año	2776774.95
Bagazo	USD/año	140426.06
Ingresos totales	USD/año	2917201.01

La instalación del deaireador, la caldera y el turbogenerador al esquema actual se logra 2,917,201.01 USD/año en la venta de energía eléctrica al SEN y 140,426.06 USD/año en la venta de bagazo a bioeléctricas, los ingresos totales son 2,917,201.01 USD/año.

En la tabla 43 se encuentra los costos de inversión (adquisición, instalación, mantenimiento) y los ingresos económicos anuales para poder determinar el VAN y la TIR, así como la vida útil del proyecto 20 años y la tasa de descuento 8 %, el costo de mantenimiento anual del central se le adjudica el 100 % a la venta de electricidad y bagazo.

Tabla 43. Costo inversión e ingresos anuales escenario 2.

Variable	Unidad	Valor
Inversión total	USD	10249017.92
Costo de mantenimiento	USD/año	887822
Ingresos totales	USD/año	2917201.01
Vida útil del proyecto	año	20
Tasa de descuento	%	8

En el gráfico 6 se muestran los valores del VAN para cada año, el valor actual neto del proyecto (VAN) da un valor de 49,258,687.94 USD por lo que es rentable y la inversión se recuperaría a los 6 años de iniciado el proyecto, la tasa interna de retorno (TIR) da un valor de 17.13 %.

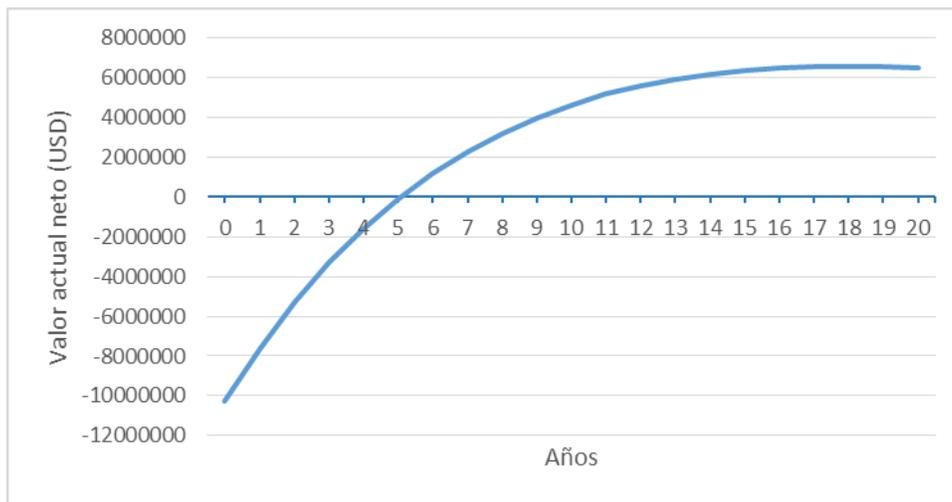


Gráfico. 6. Valor actual neto para el escenario 2.

Con la instalación del deaireador, la caldera y el turbogenerador se deja de emitir 8.18 tonCO₂/h a la atmósfera y 2.56 ton_{comb}/h ahorrado, para una zafra se evitaría 15,894 toneladas de CO₂ y 4,995 toneladas de combustible más que el esquema actual, lo que corresponde a 23,304 tonCO₂/año dejadas de emitir a la atmósfera y 7,283 ton_{comb}/año dejadas de consumir o ahorrado al país 3,043,930 USD/año.

3.3. Comparación de los escenarios.

Para comparar los resultados obtenidos se debe conocer que al escenario 1 se le instaló un tanque presurizado (deaireador) para aumentar la temperatura a la entrada de la caldera para lograr mayor eficiencia junto a un mayor ahorro de bagazo, también se le instaló un generador de 2 MW para incrementar la generación, ya que el esquema actual tiene acoplado un reductor que admite una potencia de hasta 3 MW, en el escenario 2 se instaló el deaireador, una caldera de 65 bar, 510 °C y un turbogenerador de contrapresión SST-120 de 10 MW. En la tabla 44 encontramos el resumen de los resultados obtenidos para los tres esquemas.

Tabla 44. Resultados obtenidos.

Parámetros	Unidad	Esquema actual	Escenario 1	Escenario 2
Capacidad de molienda	ton/h	96.78	96.78	96.78
Índice de consumo de vapor	tonv/toncm	0.48	0.48	0.48
Generación de vapor	tonv/h	46.45	50.03	50.03
Cantidad de bagazo disponible	tonb/h	29.03	29.03	29.03
Potencia generada	kW	2924.47	3149.64	9365.49
Potencia neta	kW	2898.16	3122.57	9231.57
Consumo de bagazo	ton/h	20.93	21.1	22.1
Factor de utilización	%	85.36	85.42	87.66
Sobrante de bagazo	tonb/h	8.11	7.94	6.93
Energía eléctrica vendida al SEN	USD/año	69242	176639	2833457
Bagazo vendido	USD/año	210564	160892	140426
Ingresos anual	USD/año	279806	337531	2973883
Inversión	USD	-	349097	10249018
Costo mantenimiento	USD/año	477862	491826	887822
VAN	USD	-	348092	53731365
TIR	%	-	10.15	17.85
Ahorro combustible	toncomb/año	2287	2451	7283
CO ₂ evitados al ambiente	tonco ₂ /año	7320	7843	23304
Mantenimiento amortizado	USD/año	-	270504 (55 %)	887822 (100 %)

Partiendo de los resultados obtenidos representados en la tabla 44 los escenarios propuestos parten de una capacidad de molienda de 96.78 ton/h a máxima capacidad, un índice de consumo de vapor y cantidad de bagazo disponible de 0.48 ton_{vapor}/ton_{caña molida} y 29.03 ton/h respectivamente, la generación de vapor en cada esquema se incrementa a 50.03 ton_{vapor}/h a diferencia del esquema actual que es 46.45 ton_{vapor}/h debido a la incorporación del deaireador por el cual necesita producir más vapor.

En el escenario 1 aumenta la potencia neta generada 224 kW mientras que en el escenario 2 aumenta 6,333 kW. El factor de utilización de cogeneración aumenta de 85.36 % en el esquema actual a 85.42 % en el escenario 1 y 87.66 % en el escenario 2.

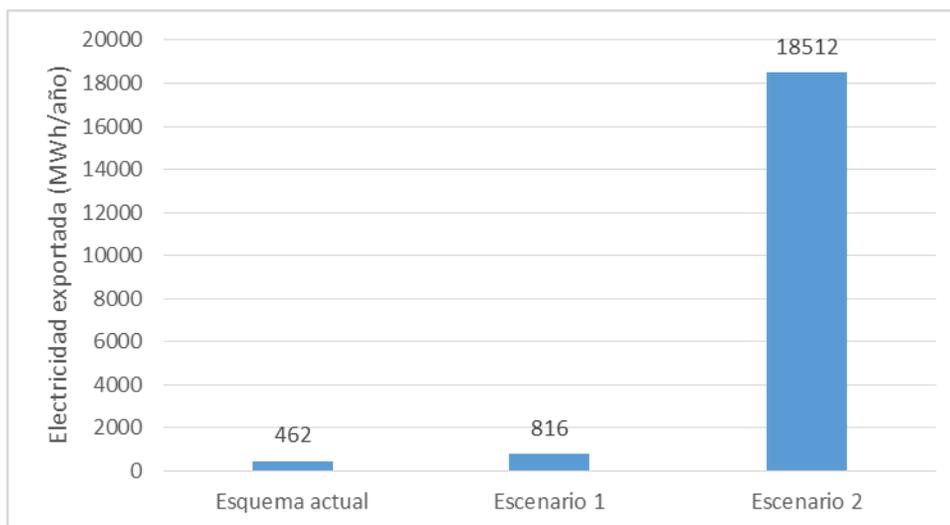


Gráfico. 7. Electricidad exportada a la red al año.

En el gráfico 7 se muestra los MWh exportadas a la red al año, el escenario 2 exporta 18,512 MWh/año, el escenario 1 exporta 816 MWh/año y el esquema actual 462 MWh/año.

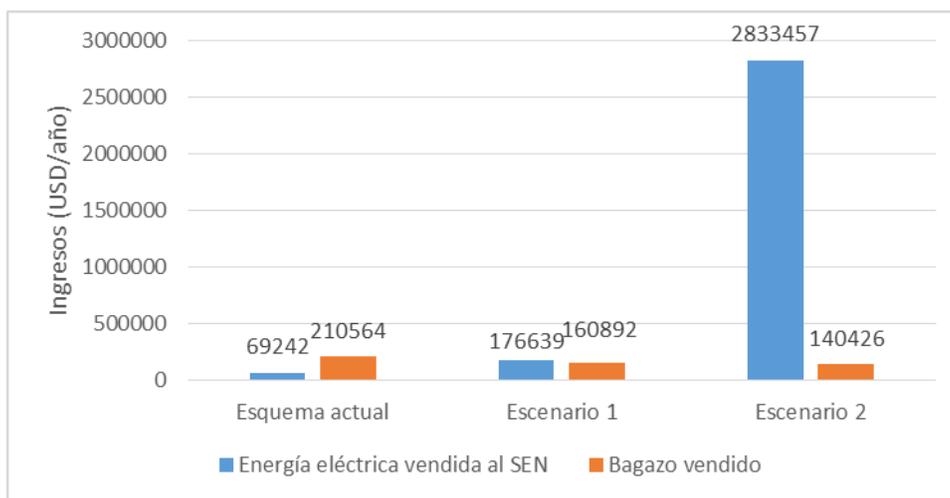


Gráfico. 8. Ingresos al año de cada esquema.

El gráfico 8 muestra las ventas de electricidad al SEN y bagazo de cada escenario al año, donde analizando cada esquema se puede apreciar un aumento de los ingresos por año debido a la incorporación de las mejoras, los ingresos en comparación al esquema actual han aumentado 57,725 USD/año en el escenario 1 y 2,694,0747 USD/año en el escenario 2.

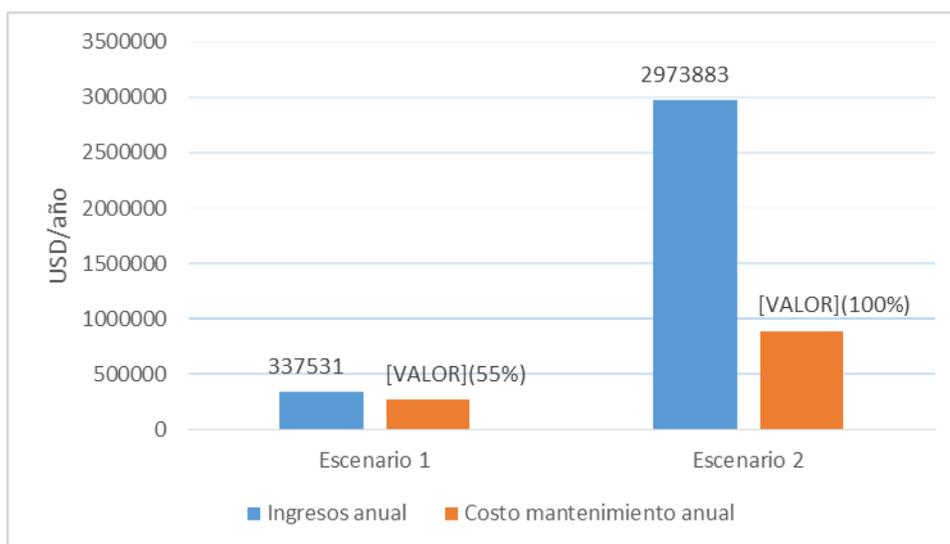


Gráfico. 9. Ingresos y costo de mantenimiento al año.

En el gráfico 9 se muestran los ingresos y costo de mantenimiento generales al año, en el escenario 1 se adjudica el 55 % y en el escenario 2 el 100 % del costo general de mantenimiento a la venta de energía eléctrica y bagazo.

Tabla 45. Ventajas y desventajas de los escenarios con respecto al esquema actual.

Parámetros	Unidad	Escenario 1	Escenario 2
Potencia generada	kW	225	6441
Potencia neta	kW	224	6333
Energía eléctrica vendida al SEN	USD/año	107397	2764215
Bagazo vendido	USD/año	-49672	-70138
Ingresos anual	USD/año	57725	2694077
Ahorro combustible	toncomb/año	163	4995
CO ₂ evitados al ambiente	tonco ₂ /año	523	15984

En la tabla 45 podemos encontrar las ventajas y desventajas de los escenarios con respecto al esquema actual, el escenario 1 genera 224 kW de potencia, vende 107,397 USD/año, ahorra 163 ton_{comb}/año y evita 523 tonCO₂/año más que el esquema actual, mientras que el escenario 2 genera una potencia de 6,333 kW, vende 2,764,215 USD/año, ahorra 4,995 ton_{comb}/año y evita 15,984 tonCO₂/año más que el esquema actual.

Conclusiones:

- 1- En consecuencia, al deterioro progresivo del Medio Ambiente, la industria azucarera se lanza como una de las principales vías de producción de electricidad junto a las energías renovables, ya que son formas más limpias de obtener electricidad sustituyendo los combustibles fósiles (altos contaminante).
- 2- El central azucarero Carlos Baliño presenta un índice de consumo de vapor de 0.48 toneladas de vapor por toneladas de caña molida, valor mejorable, aunque está dentro del rango de 0.35 – 0.55 para centrales azucareros de acuerdo con la bibliografía.
- 3- Con la instalación del deaireador y el generador de 2 MW para el escenario 1 se logra un aumento en la energía neta generada de 224 kWh, en el escenario 2 con la instalación del deaireador, la caldera y el turbogenerador de 10 MW se logra un aumento en la energía neta generada de 6,333 kWh.
- 4- Ambos escenarios de acuerdo con el VAN y la TIR son rentables, el escenario 2 logra adjudicar a la venta de energía eléctrica y bagazo el 100 % del mantenimiento general de la industria, mientras el escenario 1 logra amortizar el 55 %.
- 5- La recuperación de la inversión del escenario 1 se alcanza en 7 años mientras que para el escenario 2 en 6 años para una vida útil del proyecto de 20 años.
- 6- En ambos escenarios se deja de consumir combustible en la generación de electricidad del país y así se deja de emitir CO₂, en el primero se ahorra 2,451 ton_{comb}/año lo que equivale a 1,024,396 USD/año y 7,843 tonCO₂/año, en el segundo 7,283 ton_{comb}/año lo que equivale a 3,043,930 USD/año y 23,304 tonCO₂/año.

Recomendaciones:

1. Realizar un estudio posterior para lograr disminuir el índice de consumo de vapor del central azucarero Carlos Baliño.
2. Trazar planes de zafra que logren el abastecimiento de caña para operar a su máxima capacidad.

Bibliografía.

- AROCHA MORFA, L. A. 2016. *Evaluación y propuestas de mejoras del esquema termo energético de la Unidad Empresarial de Base "Carlos Baliño"*. Marta Abreu de Las Villas.
- AZCUBA. 2019. *Estadísticas internacionales* [Online]. Available: www.azcuba.cu [Accessed].
- BARTENS, A. 2007. *Cane Sugar Engineering*.
- BROADFOOT 2001.
- CASANOVA CABEZA, E. A. D. O. O. C. H. M. L. F. J. 2015. Tecnología azucarera
- Conocimientos y práctica productiva
- CEPCI. 2014. *Economic Indicators* [Online]. Available: www.chemengonline.com/pci [Accessed].
- CUBADEBATE. 2017. *Inicia construcción de la mayor bioeléctrica cubana para producir energía limpia*. [Online]. [Accessed].
- ESCAMILLA CÓBAR, M. A. 2007. *ANÁLISIS ENERGÉTICO INTEGRAL DE INGENIO SANTA TERESA, S.A.*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- FORESIGHTCUBA. 2013. *La industria azucarera cubana* [Online]. Available: <http://foresightcuba.com/category/economia/> [Accessed].
- GARCÍA RODRÍGUEZ. YUNIER.MSC LÓPEZ HERVIS. YONEY.DR BENÍTEZ HERNÁNDEZ. AGUSTÍN 2014. Optimización del sistema energético de un central azucarero para maximizar el excedente de bagazo *Revista avanzada científica*.
- GUTIÉRREZ, E. 2013. El azúcar cubano adquiere protagonismo energético. *Diarios latinoamericanos de Tierramérica*.
- HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, B. 2018. Bioeléctricas. Proyecto líder de la eficiencia energética con biomasa.
- HERRERA MOYA, I. 2007. *Evaluación de alternativas para un sistema de bombeo y transporte de agua*. Trabajo extraclase, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- HUGOT, E. 1986. *HANDBOOK OF CANE SUGAR ENGINEERING*.
- JENKINS, S. 2019. CHEMICAL ENGINEERING PLANT COST INDEX: 2018 ANNUAL VALUE. *Chemical Engineering*.
- KONG WIN CHANG 2001.
- KONRAD BURIN, E. B., LEONARDO.LO GIUDICE, PEDRO. 2015. Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme. *Applied Energy*.
- MATCHES. 2014. *Boile Cost Estimate* [Online]. Available: www.matche.com [Accessed].
- MINAZ 2002. Reunión Nacional Frente Científico Técnico Azucarero.
- PEÑA CASTELLANOS, D. L. 2003. *El mercado azucarero mundial y la agroindustria azucarera cubana: condicionante competitivas*. Universidad de La Habana.
- PÉREZ RAMOS, L. D. 2014. *Integración de procesos y análisis de cogeneración en las producciones de azúcar y alcohol*. Trabajo de diploma.
- PERRY, R. H. M., JAMES O. 1999. *Perry's Chemical Engineers*.
- PETERS, M. S. T., KLAUS D.WEST, RONALD E. 2002. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*
- PETROLEUM, B. 2019. *Crisis energética; respuesta a los resto energéticos del siglo XXI* [Online]. Available: www.crisisenergetica.org [Accessed].
- REID AND REIN 1983.
- ROSA VILA, J. C. 2019. Economic Director of AzCuba Group in Villa Clara. *In: HERRERA MOYA, I. (ed.)*.

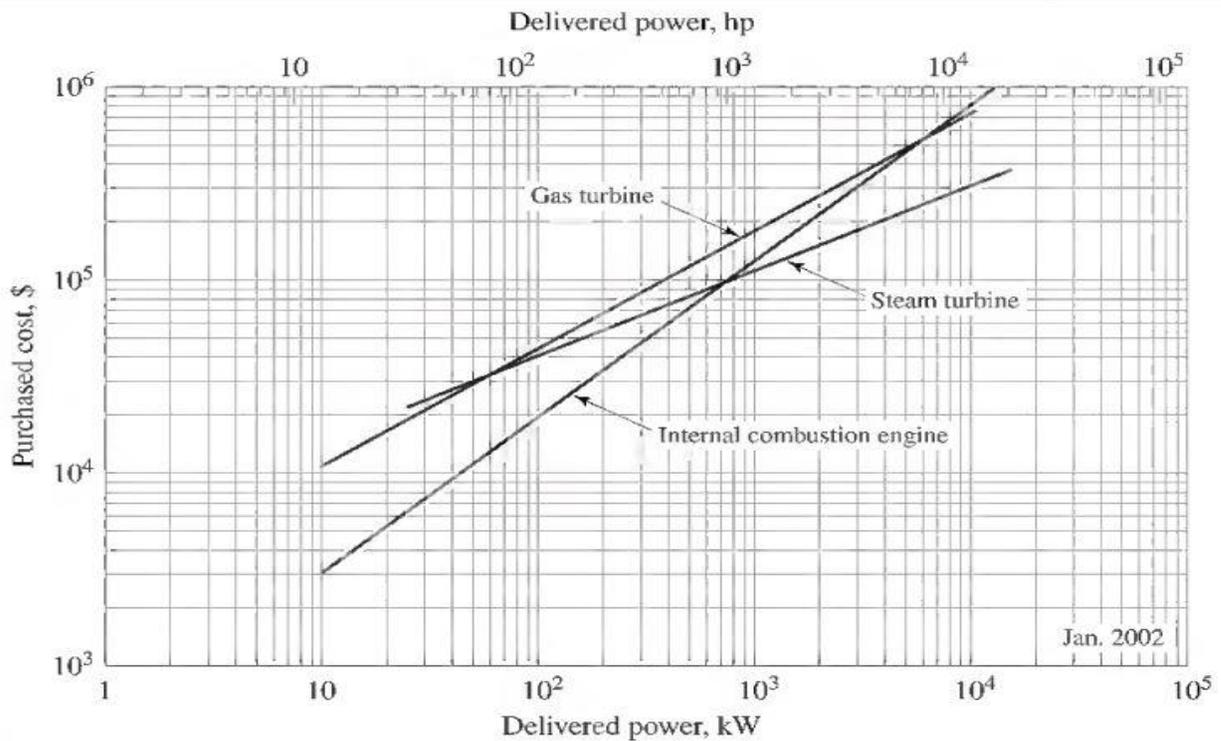
- ROSENBERG, B. T., MARKUS. 2019. *Energy scheme proposal for small sugar mills for maximum electricity generation and bagasse saving during harvesting season. A case study on Carlos Baliño* Royale Institute of Technology (KTH).
- RUBIO GONZÁLEZ. ANGEL M, P. R. R. D. 2014. ESTUDIO ECONÓMICO Y CONSIDERACIONES TÉCNICAS SOBRE LA CONVENIENCIA DEL EMPLEO DE PRESIÓN DE VAPOR DE 67 ó 100 BAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE BIOELÉCTRICAS EN CUBA.
- RUÍZ, D. M. 2006. Estudio de Ingeniería Integral del Ingenio.
- SALOMÓN, R. 2016. Bioeléctricas despiertan creciente interés mundial.
- SICILIA ALBA, D. 2014 *Evaluación de alternativas de cogeneración en la UEB Central Carlos Baliño* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- SIEMENS. 2017. *Efficiency: More value to your facility* [Online]. Available: www.siemens.com/steamturbines [Accessed].
- SOLARES, M. 2011. Indicadores para medir la eficiencia en el proceso de generación de energía de un central azucarero.
- UNEI 2018. Anuario estadístico de Cuba 2017. *Minería y energía*.

Anexos:

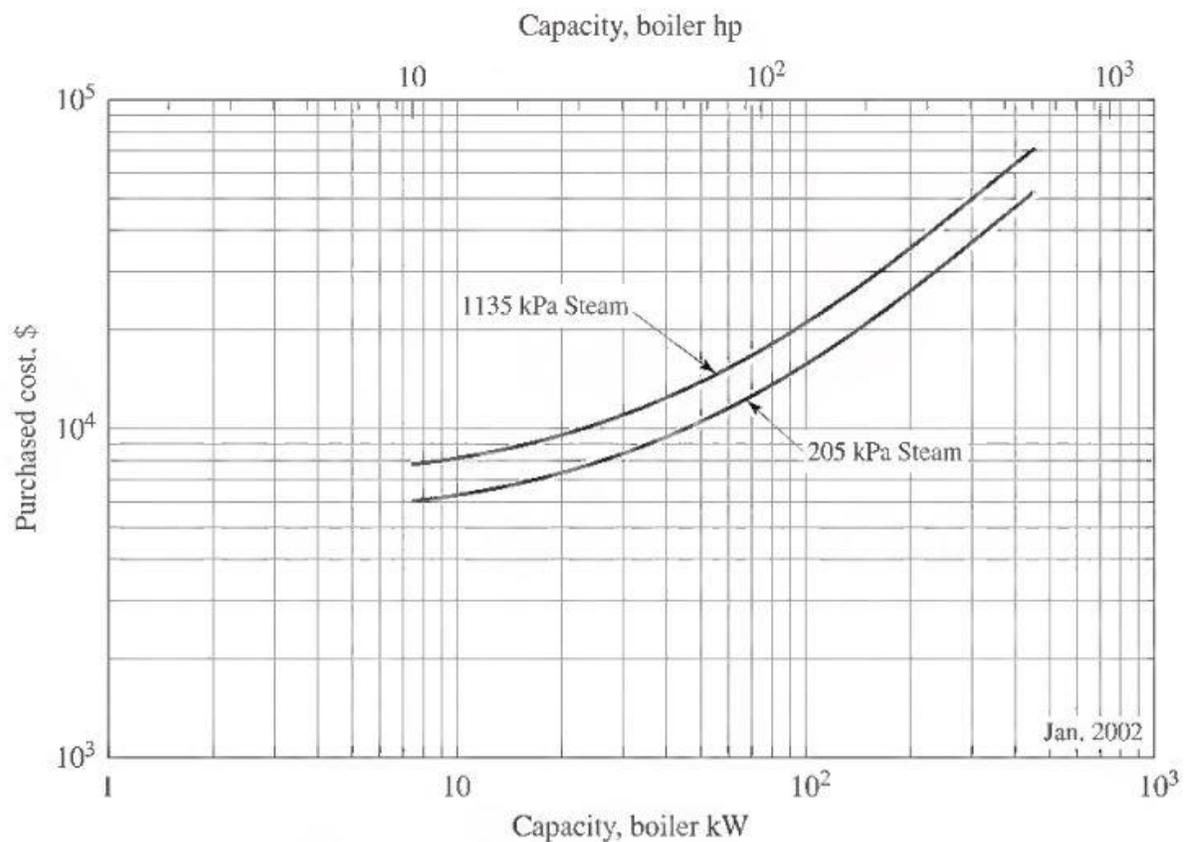
Anexo 1. Índice de Costo.

Year	Marshall and Swift installed-equipment indexes, 1926 = 100		Eng. News-Record construction index			Nelson-Farrar refinery construction index, 1946 = 100	Chemical Engineering plant cost index, 1957D 1959 = 100
	All industries	Process industry	1913 = 100	1949 = 100	1967 = 100		
1987	814	830	4406	956	410	1121.5	324
1988	852	859.3	4519	980	421	1164.5	343
1989	895	905.6	4615	1001	430	1195.9	355
1990	915.1	929.3	4732	1026	441	1225.7	357.6
1991	930.6	949.9	4835	1049	450	1252.9	361.3
1992	943.1	957.9	4985	1081	464	1277.3	358.2
1993	964.2	971.4	5210	1130	485	1310.8	359.2
1994	993.4	992.8	5408	1173	504	1349.7	368.1
1995	1027.5	1029.0	5471	1187	509	1392.1	381.1
1996	1039.1	1048.5	5620	1219	523	1418.9	381.7
1997	1056.8	1063.7	5825	1264	542	1449.2	386.5
1998	1061.9	1077.1	5920	1284	551	1477.6	389.5
1999	1068.3	1081.9	6060	1315	564	1497.2	390.6
2000	1089.0	1097.7	6221	1350	579	1542.7	394.1
2001	1093.9	1106.9	6342	1376	591	1579.7	394.3
2002	1102.5 [‡]	1116.9 [‡]	6490 [‡]	1408 [‡]	604 [‡]	1599.2 [‡]	390.4 ^{†,§}

Anexo 2. Costo de compra de turbinas de vapor.



Anexo 3. Costo de compra calderas o generadores de vapor.



Anexo 4. Consumo de combustible para generar un kW.

AÑOS	Total	Termo- eléctricas	Turbinas de gas	Grupos electrógenos		Tecnología nueva
				Diesel ^(a)	Aisladas ^(a)	
2010	262,8	277,5	490,3	224,4	227,4	218,0
2011	261,7	276,7	439,7	224,2	233,1	217,8
2012	261,7	276,7	439,7	219,9	233,1	217,3
2013	262,5	277,8	449,8	219,2	227,5	218,3
2014	265,3	279,8	460,9	219,0	228,2	220,0
2015	257,8	272,1	638,8	218,3	227,9	218,1
2016	259,7	273,3	475,4	217,9	227,7	220,3

Anexo 5. Costo de un generador eléctrico.

