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

Facultad de Química-Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

"PREFACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CENTRAL ANTONIO SÁNCHEZ"

Autor: Serguei Menes Alomá

Tutores: Dr. Jorge Leiva Mas.

Ing. Abel Hernández Sardiñas.

Consultante: Ing. Lázaro Juan Vilches Ferreiro.

"Año 55 de la Revolución"

SANTA CLARA
CURSO 2012 - 2013

"Hay que trabajar para enriquecer los conocimientos adquiridos durante los estudios, para saberlos aplicar en la práctica de manera creadora y recordar que la realidad es siempre mucho más rica que la teoría, pero que la teoría es imprescindible para desarrollar el trabajo profesional de un mundo científico."

Fidel Castro Ruz.

- *A mis padres, por su gran apoyo, cariño y constante preocupación durante todos estos años.*
- *A mi novia Elizabeth, por acompañarme y apoyarme en este sueño, por estar presente en todo momento y creer en mí.*
- *A mi familia, que se ha preocupado por mí, y a todas mis amistades que me han apoyado todo este tiempo.*
- *A mi suegra Idalmis y a Yasiel por toda la ayuda que me han brindado siempre.*
- *A mis compañeros de aula, con los que he vivido momentos buenos y difíciles durante todo este tiempo, a mis compañeros de estudio el Norbe, Franly, Victor, Yamila, Yeini, Lili, Yeni y a todos los que de forma general han compartido su amistad conmigo, gracias.*
- *A mi tutor Leiva, por guiarme y por brindarme todo el tiempo el apoyo necesario para la realización de esta investigación.*
- *A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Química que contribuyeron en mi formación.*
- *A Vilches, amigo que me ayudó y compartió valiosa información para la realización de este trabajo.*
- *A todos los trabajadores del Central Antonio Sánchez que me ayudaron en su momento en especial a Abel mi tutor en la fábrica, a Carmen, a Frank y a Rosita.*

Resumen.

En el presente trabajo se realizó un estudio técnico – económico para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa agroindustrial y forestal en el central Antonio Sánchez del municipio Aguada de Pasajeros, Cienfuegos.

Se realizó un diagnóstico técnico de la instalación existente lo que permitió determinar los puntos débiles del proceso. Se determinaron los consumos de vapor y la capacidad de generación de energía eléctrica en las condiciones existentes para conocer la cantidad de electricidad entregada al Sistema Electroenergético Nacional.

Se efectuaron además, los balances de masa y energía considerando una inversión inicial para montar un turbo de extracción - condensación y una caldera de alta presión, planteándose dos variantes principales: la primera empleando como combustible el bagazo del propio central y una cantidad adicional del central Caracas así como los Residuos Agrícolas Cañeros y una segunda variante en la que se añade además marabú como combustible para la generación de electricidad.

Se realizó la evaluación económica de ambas variantes por medio de un estudio de factibilidad determinando los principales indicadores económicos de rentabilidad.

Abstract

In the present work, a technical and economic study for the generation of electricity from agro-forestry biomass was developed in Antonio Sanchez Sugar Refinery which belongs to Aguada de Pasajeros Municipality, Cienfuegos Province.

It was performed a technical diagnosis of the existing facility allowing to identify weak points in the process. Consumption and steam generation capacity of electricity in the existing conditions were determined for the amount of electricity delivered to the National Power Grid.

There were made also the mass and energy balances considering an initial investment to mount extraction-condensing turbo and high pressure boiler, considering two main variants: the first using bagasse as fuel belonging to the Sugar Refinery itself and an additional amount of Caracas Sugar Refinery and Agricultural Sugarcane Residues, and a second variant where marabú further added as fuel for electricity generation.

Economic evaluation was performed of both variants by means of a feasibility study identifying main economic indicators of profitability.

Índice

Introducción. 1

Capítulo I. Revisión Bibliográfica. 3

1.1. Introducción 3

1.2- Métodos de conversión de la biomasa en energía. 4

1.2.1- Métodos termoquímicos. 4
1.2.1.1-Combustión. 4
1.2.1.2- Pirólisis: 5
1.2.1.3 - Gasificación: 5
1.2.2 - Métodos biológicos 6
1.2.2.1- La fermentación alcohólica: 6
1.2.2.2- La fermentación metánica. 6
1.3- Aplicaciones de la Biomasa 7

1.3.1- Producción de Energía Térmica 7
1.3.2- Producción de Energía Eléctrica. 7
1.3.3- Producción de Biocombustibles. 8
1.3.3.1-Biodiesel. 8
1.3.3.2-Bioetanol. 9
1.3.3.3- Producción de gases combustibles. 9
1.4-Ventajas del uso de la biomasa. 11

1.5-Desventajas del uso de la biomasa 11

1.6- Agroindustria Azucarera: principal fuente de biomasa en Cuba. 12

1.6.1-Caracterización del bagazo como combustible 13
1.6.1.1Composición física del bagazo 13
1.6.1.2-Composición Química del bagazo. 14
1.6.1.3-Calor específico de combustión del bagazo. 15
1.6.1.4-Contenido de humedad. 15
1.6.1.5-Contenido de Cenizas. 15
1.6.1.6-Granulometría. 16
1.6.2-Caracterización de los RAC como combustible. 16
1.6.2.1-Calor específico de combustión. 17
1.6.2.2- Contenido de humedad. 17
1.6.2.3-Contenido de ceniza. 18
1.6.3-Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera 18
1.6.4-Otras fuentes de biomasa. 19
1.6.4.1-Marabú 19
1.7-Cogeneración 20

1.7.1-Generadores de Vapor. 22
1.7.1.1-Características de los generadores de Vapor 22
1.7.1.2-Clasificación de los Generadores de Vapor 22
1.7.2-Turbinas de vapor 24

1.7.2.1-Clasificación de las turbinas de vapor 24
1.7.3-Condensación 26
1.7.3.1-Tipos de Condensadores 26
1.7.4-Bombas. 27
1.7.4.1-Clasificación de las bombas centrífugas. 27
1.8-Manejo de la energía térmica en el proceso de fabricación de azúcar. 28

1.9-Conclusiones Parciales 28

2. Capítulo II. 30

2.1. Caracterización energética de la Empresa 30

2.2. Valoración de diferentes escenarios futuros. 30

2.3. Balance de masa y energía en las condiciones actuales. 31

2.3.1.Balance Total en los Molinos 31
2.3.2. Balance en la estación de purificación. 32
2.3.3. Balances en la estación de evaporación. 34
2.3.4. Balances de energía del proceso 35
2.4. Análisis de los Resultados: 51

2.4.1. Análisis de la variante 1. Balances de masa y energía. 51
2.4.2. Análisis de la variante 2. Balances de masa y energía. 57
2.5. Conclusiones parciales del capítulo 2. 59

3. Capítulo 3. Análisis económico. 60

3.1 Introducción 60

3.2 Determinación del costo total de inversión para ambas alternativas. 60

3.3 Determinación del costo total de producción para las variantes evaluadas. 61

3.4. Análisis económico Variante 1 61

3.5. Análisis económico Variante 2 63

3.6. Conclusiones Parciales 64

Conclusiones Generales. 66

Recomendaciones 67

Bibliografía. 68

Anexos 73

Introducción.

En las últimas décadas, la comunidad internacional ha asumido como una de sus principales premisas la búsqueda de nuevas alternativas encaminadas al logro del desarrollo sostenible. Para ello uno de los grandes problemas que debe resolver es la disminución del consumo de combustibles fósiles, debido al agotamiento inevitable de las reservas por los altos niveles de consumo, y por la necesidad de reducir las emisiones de los gases contaminantes y de efecto invernadero que afectan a la atmósfera y al medio ambiente en general.

Una de las nuevas fuentes de energía renovable es la obtenida a partir de la biomasa pues esta constituye un combustible no fósil, neutro desde el punto de vista del ciclo del carbono al producir emisiones de CO_2 que proceden de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, por tanto no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico y no incrementan el efecto invernadero.

Actualmente la biomasa es aprovechada energéticamente para diversas aplicaciones como es la generación de calor, frío, electricidad o para el transporte, de manera que para facilitar su uso se transforma en biocombustible sólido como pellets, briquetas o astillas; en estado líquido como biodiesel o bioetanol y en estado gaseoso como biogás.

En Cuba existe un elevado potencial de recursos biomásicos provenientes de la agroindustria azucarera y forestal; estos recursos no se aprovechan adecuadamente y todavía el peso de la generación de electricidad proviene de las centrales termoeléctricas, con un alto índice de contaminación ambiental.

El bagazo de caña de azúcar constituye uno de los principales recursos cuyo aprovechamiento integral y eficiente ofrece nuevas perspectivas para el desarrollo del país. En Cuba este constituye la principal fuente de biomasa, dada la gran cantidad que se produce anualmente durante el período de zafra, aunque también existen otras fuentes representadas por recursos forestales, entre ellos, el marabú, considerado el arbusto leñoso de mayor proliferación en los últimos años en Cuba.

En la UEB Central Antonio Sánchez perteneciente a la provincia Cienfuegos, se estudia la posibilidad de emplear residuos agroindustriales y recursos forestales como biomasa para la generación de energía eléctrica.

Atendiendo a la información presentada anteriormente se plantea como **Situación problémica:**

La crisis energética actual a nivel mundial y los elevados precios del petróleo en el mercado mundial, hacen necesario que se le preste mayor atención a la utilización de las fuentes de energía renovable. En Cuba existe un potencial de biomasa en la agroindustria azucarera, forestal y otras que permiten su utilización como combustible en la generación de electricidad, por lo que se requiere disponer de tecnologías que permitan dicha generación con estas fuentes de biomasas de forma segura desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

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

Es posible aumentar la generación de energía eléctrica en el central Antonio Sánchez de forma segura y estable, empleando la biomasa que brinda la agroindustria azucarera y forestal como fuente de energía renovable mediante la instalación de una tecnología apropiada.

En correspondencia con el problema científico planteado, el **objetivo general** de la investigación es:

Efectuar un estudio de factibilidad técnica – económica de la generación de energía eléctrica en el central Antonio Sánchez empleando la biomasa que brinda la agroindustria azucarera y forestal.

Para validar la hipótesis y resolver el problema científico proyectado, los **objetivos específicos** del trabajo son:

1. Proponer la tecnología a instalar en la planta a partir de un análisis de la bibliografía consultada.
2. Analizar y seleccionar las fuentes de biomasa más adecuada para el proceso según las posibilidades técnicas y económicas y ambientales.
3. Realizar los balances de materiales y energía en el proceso para cada variante propuesta.
4. Analizar la factibilidad técnico económico de las variantes propuestas.

Capítulo I. Revisión Bibliográfica.

1.1. Introducción

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

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

A pesar de ello, la biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas rurales, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro.
(http://energiabiomasa-09.blogspot.com/2009/09/historia-de-la-biomasa.html)

En las últimas décadas, los países desarrollados y la comunidad internacional en general han tomado conciencia de los grandes problemas que aquejan al mundo y de la necesidad de ir hacia un desarrollo sostenible. Uno de los grandes problemas que debe ser resuelto es la disminución del consumo de combustibles fósiles, debido al agotamiento inevitable de las reservas por los altos niveles de consumo, y por la necesidad de reducir las emisiones de los gases contaminantes y de efecto invernadero que afectan a la atmósfera y al medio ambiente en general. Por este motivo en los últimos años se han estado buscando nuevas fuentes de energía, renovables y limpias, que ayuden a reducir el consumo de aquellos y la consiguiente emisión de gases de contaminantes.

Entre las fuentes renovables de energía en estudio, la más antigua, utilizada y difundida, es la energía obtenida a partir de la biomasa.**(Diez, 2012**)

Bajo el término biomasa se incluye toda la materia orgánica que tiene su origen inmediato en un proceso biológico (Fernández, 1995). Se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros).(**FOCER, 2002**).

La biomasa, como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural, residual y los cultivos energéticos.

- La biomasa natural es la que se produce en los ecosistemas naturales (Lozanoff, et al; 2007), sin intervención humana. Por ejemplo, la caída natural de ramas de los árboles (poda natural) en los bosques.
- La biomasa residual es el residuo generado en las actividades agrícolas (poda, rastrojos, etc.), silvícolas y ganaderas, así como residuos de la industria agroalimentaria (alpechines, bagazos, cáscaras, vinazas, etc.) y en la industria de transformación de la madera (aserraderos, fábricas de papel, muebles, etc.), así como residuos de depuradoras y el reciclado de aceites.
- Los cultivos energéticos son aquellos que están destinados a la producción de energía térmica, eléctrica y biocombustibles. Además de los cultivos existentes para la industria alimentaria (cereales y remolacha para producción de bioetanol y oleaginosas para producción de biodiésel), existen otros cultivos como los lignocelulósicos forestales y herbáceos. (http://es.wikipedia.org/wiki/Biomasa)

1.2- Métodos de conversión de la biomasa en energía.

La biomasa para poder ser usada debe ser transformada según el uso final de esta. Los métodos de transformación de la biomasa pueden ser métodos termoquímicos o métodos biológicos.

1.2.1- Métodos termoquímicos. Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y, en particular, a los de la paja y de la madera.

1.2.1.1-Combustión. Es la oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

El proceso de combustión puede consistir en una simple reacción química, pero con más frecuencia consta de todo un conjunto de reacciones químicas elementales que ocurre a gran velocidad y con una intensa razón de liberación de calor. Con fines energéticos comúnmente se utilizan reacciones de combustión de combustibles naturales y artificiales con el oxígeno del aire atmosférico, y en casos particulares con aire enriquecidos con oxígeno, o con oxígeno más o menos puro. **(Roque, 1990)**

1.2.1.2- Pirólisis: La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa **(Gómez, et al., 2008)**, esta se produce a través de reacciones complejas donde ocurre rompimiento de enlaces químicos debido a calentamiento en ausencia de aire u oxígeno **(García, 2007)** a altas temperaturas alrededor de unos 500 grados centígrados, se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. La pirólisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros.

Este gas, de débil poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, o para producir electricidad, y para mover vehículos **(Puigjaner, 2011)**. Una variante de la pirólisis, llamada pirólisis flash, llevada a 1000 grados centígrados en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis. Las instalaciones en la que se realizan la pirólisis y la gasificación de la biomasa reciben el nombre de gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente como se indica antes, o bien servir la base para la síntesis de un alcohol muy importante, el metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

1.2.1.3 - Gasificación: El proceso de gasificación consiste en la conversión de la biomasa en un gas combustible, que actúa de portador de energía, mediante una oxidación parcial a alta temperatura. **(Puigjaner, 2011)**

A diferencia del proceso de combustión en el que la biomasa se quema en exceso de aire para asegurar la combustión completa, en el proceso de gasificación la cantidad de oxígeno es de un quinto a un tercio de la cantidad requerida teóricamente para la combustión completa. El principal producto del proceso es un gas combustible, cuyo poder calorífico varía dependiendo de la atmósfera de gasificación o agente gasificante. Es el medio gaseoso el que reacciona con el combustible sólido desencadenando una serie de reacciones heterogéneas y homogéneas.

En general, puede denominarse como gasificación todos los procesos que tienen lugar con una combustión en condiciones de déficit de oxígeno, con producción de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones variables según la composición de la materia prima y las condiciones de operación del proceso.

Con la gasificación de la biomasa, un material sólido heterogéneo es convertido en un gas combustible de calidad consistente que puede ser usado con confiabilidad para el calentamiento, para la aplicación en procesos industriales, generación de electricidad y la producción de combustibles líquidos. **(Bain, 2011)**

1.2.2 - Métodos biológicos

1.2.2.1- La fermentación alcohólica: Es una antigua técnica empleada con los azúcares, que puede utilizase también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias. Pero la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidro, es una operación muy costosa en energía.

En estas condiciones la transformación de la biomasa en etanol y después la utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso. A pesar de esta reserva, ciertos países (Brasil, E.U.A.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo energético (propulsión de vehículos; cuando el alcohol es puro o mezclado con gasolina, el carburante recibe el nombre de gasohol).

1.2.2.2- La fermentación metánica.

La fermentación metánica también conocida como digestión anaerobia es un complejo proceso natural que involucra la biodegradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno resultando del proceso un biogás **(Lorenzini, et al., 2010).** Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75% de humedad relativa).En los fermentadores, o digestores, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico.

El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo, para mantenerlo en la temperatura óptima de 30-35 grados centígrados. No obstante, el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas, por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo. Así, millones de digestores ya son utilizados por familias campesinas en todo el mundo.

1.3- Aplicaciones de la Biomasa

La biomasa se puede utilizar para diversas aplicaciones, como es la generación de calor, de frío, de electricidad o para transporte, de manera que para facilitar su uso se transforma en biocombustible sólido (pellets, briquetas o astillas), líquido-biodiesel o bioetanol o gaseoso-biogás. En muchos casos, la biomasa puede considerarse como una forma de energía solar almacenada ya que las plantas utilizan esta energía para capturar CO_2 y agua, a través de la fotosíntesis.
(http://www.economiadelaenergia.com/2011/03/biomasa/)

1.3.1- Producción de Energía Térmica

Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas.

1.3.2- Producción de Energía Eléctrica.

Obtenida minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda) y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido (Chopo, Sauce, Eucalipto, Robinia, Coníferas, Acacia, Plátano) y herbáceos (Cardo lleno, Miscanto, Caña de Provenza, Euforbias, Chumberas). También se utiliza el biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora, Residuos Sólidos Urbanos) para generar electricidad.

El rendimiento neto de la generación de electricidad en las plantas de biomasa es bajo, del orden dl 20% referido a su poder calorífico inferior. Ello se debe fundamentalmente al pequeño tamaño de la planta de producción. La caldera tiene un rendimiento moderado al quemar un combustible de alto contenido en humedad, y su consumo en servicios auxiliares es alto, por encima del 8% de la producción total de electricidad en salida de alternador.

Una posibilidad de incrementar el rendimiento energético en el uso de la biomasa es la cogeneración de calor y electricidad. La condensación del vapor supone una evacuación de calor cercano a la mitad de la energía contenida en la biomasa; la recuperación de parte de ese calor de condensación en forma de vapor de baja temperatura o agua caliente, para usos

industriales o domésticos, supone un aumento de la eficiencia energética. Para ello se puede disponer de una turbina de contrapresión o bien hacer una extracción de vapor con volumen significativo en la zona de baja presión de la turbina. Se instalan los intercambiadores de calor adecuados y se pueden obtener rendimientos globales de entre un 40 y un 60%.

La gasificación es una alternativa con mejores rendimientos que la combustión en calderas. El empleo de motores diesel o de turbinas de gas para quemar el gas producido puede elevar el rendimiento a valores por encima del 30%, sin embargo esta es una opción poco extendida. http://educasitios2008.educ.ar/aula156/biomasa/

1.3.3- Producción de Biocombustibles.

El término biocombustible engloba a todos aquellos combustibles derivados de la biomasa vegetal, los que pueden ser líquidos, gaseosos o sólidos. En general los biocombustibles sólidos se utilizan para la generación de energía térmica y no para el autotransporte.

Los biocombustibles líquidos y gaseosos dedicados para el auto transporte deben presentar como condición necesaria, características similares a los combustibles de origen fósil, tal que permitan su utilización en motores a explosión, los que conceptualmente han evolucionado en su tecnología para obtener el máximo rendimiento posible de esos combustibles fósiles. La principal ventaja de los biocombustibles es que no contribuyen a aumentar la cantidad de CO_2 emitido a la atmósfera, ya que los mismos se reciclan y no se extrañen de fuentes de carbono secuestradas de la atmósfera como son los yacimientos fósiles. **(Lozanoff, et al; 2007)**

1.3.3.1-Biodiesel.

El biodiesel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo. **(Knothe, et al; 2005)**

El biodiesel puede mezclarse con gasóleo procedente del refino de petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla. **(Lozanoff, et al; 2007)**

1.3.3.2-Bioetanol.

El etanol que proviene de los campos de cosechas (bioetanol) se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles. **(Lozanoff, et al; 2007)**

Es un biocombustible derivado de la caña de azúcar, entre otros productos agrícolas. Se caracteriza como un alcohol compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno que resulta de la fermentación de azúcar o de almidón convertido en azúcar, extraídos ambos de la biomasa. También se puede producir a partir de la celulosa contenida principalmente en los desechos agrícolas, urbanos o forestales. Para su uso comercial e industrial, siempre es desnaturalizado mediante la mezcla con pequeñas cantidades de sustancias nocivas para evitar su uso como bebida alcohólica. En Estados Unidos se extrae del maíz y otros granos mientras que en los países de Latinoamérica, se obtiene principalmente por fermentación de los jugos extraídos de la caña de azúcar.**(Figueroa, 2008)**

Sin embargo, los actuales métodos de producción de bioetanol utilizan una cantidad significativa de energía comparada al valor de la energía del combustible producido. Por esta razón, no es factible sustituir enteramente el consumo actual de combustibles fósiles por bioetanol.

Contrariamente a lo que suele creerse, en la combustión, el etanol produce más gases de efecto invernadero que la gasolina. Para buscar una ventaja ambiental en este combustible, habría que recurrir al dióxido de carbono de la atmósfera absorbido durante el crecimiento de la planta que produce el etanol (que no se volvería a emitir si no se quemara), así como en los procesos de transformación que sufren las materias primas antes de ser un combustible utilizable o también demostrando que los motores que utilicen etanol tengan un rendimiento mayor que los de gasolina (por lo dicho, bastaría que fuesen un 6% más eficientes). **(Lee, et al; 2007)** Hoy en día se utilizan tres tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico (bioetanol):

• Sustancias con alto contenido de sacarosa como: la caña de azúcar, la remolacha, melazas, sorgo dulce

• Sustancias con alto contenido de almidón como: el maíz, la patata y la yuca

• Sustancias con alto contenido de celulosa: como la madera, residuos agrícolas **(Lee, et al; 2007)**

1.3.3.3- Producción de gases combustibles.

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero

también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

El gas obtenido es de bajo poder calorífico, pero útil en aplicaciones térmicas en el propio entorno ganadero o agrícola, suministrando luz y calor. En el caso de instalaciones de mayor tamaño, se puede llegar a colocar motores diesel de hasta varios cientos de kilovatios de potencia para la generación de electricidad; existen ya ejemplos industriales de ello. La producción de gas se puede controlar adecuándola a la demanda; incluso puede hacerse que durante varias horas el digestor se mantenga embotellado, sin producir gas, durante los períodos en los que no exista consumo energético.

Otra posibilidad para la producción de gas es el empleo de un gasificador, que inyecta aire u oxígeno y vapor de agua. Opera a elevada temperatura, entre 800 y 1200ºC, con lo cual la cinética de las reacciones es más alta. El gas contiene CO, H_2, pequeñas concentraciones de metano, nitrógeno y vapor de agua. Tiene un poder calorífico medio. Existen varias alternativas de gasificación; el lecho fijo sirve para tratar pequeñas cantidades de biomasa, mientras que los de lecho fluido tratan mayores cantidades, siendo éstos utilizados para la generación de electricidad.

Al problema operativo de la gasificación, se une el de la producción de alquitranes y otros compuestos orgánicos pesados. Esto hace posible la combustión del gas en equipos industriales, calderas y hornos o en motores diesel para generación eléctrica, pero dificulta la extensión a turbinas de gas en sistemas eléctricos de alta eficiencia. La alternativa es purificar el gas, pero es caro.
http://educasitios2008.educ.ar/aula156/biomasa/

1.4-Ventajas del uso de la biomasa.

La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas medioambientales:

- Disminución de las emisiones de CO_2: aunque para el aprovechamiento energético de esta fuente renovable sea necesario proceder a una combustión, y el resultado de la misma sea agua y CO_2, la cantidad de este gas causante del efecto invernadero, se puede considerar que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, que no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.
- Si se utilizan residuos de otras actividades como biomasa, esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos. Canaliza, por tanto, los excedentes agrícolas alimentarios, permitiendo el aprovechamiento de las tierras de retirada.
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos lo cual puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.
- Permite la introducción de cultivos de gran valor rotacional frente a monocultivos cerealistas.
- Puede provocar un aumento económico en el medio rural.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.

1.5-Desventajas del uso de la biomasa

- Tiene un mayor coste de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- Menor rendimiento energético de los combustibles derivados de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles.
- Producción estacional.
- La materia prima es de baja densidad energética lo que quiere decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización
  http://educasitios2008.educ.ar/aula156/biomasa/

1.6- Agroindustria Azucarera: principal fuente de biomasa en Cuba.

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

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

Una de las mayores ventajas de la biomasa cañera es que se trata de un portador energético renovable, compatible con el medio ambiente y de rápida reposición. En el trascurso de un año, con la atención adecuada, es posible disponer de una planta con fibras suficiente para generar cantidades similares de biomasa, el ciclo de la utilización de la biomasa es cerrado.
http://www.ecured.cu/index.php/Biomasa_ca%C3%B1era

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

El uso de los RAC como combustible depende ante todo de la posibilidad de su recolección. En Cuba se cosecha el 70% de la caña en forma mecanizada por medio de cosechadoras que reintegran el 50% de los RAC al campo, posteriormente en centros de acopio y limpieza de la caña cosechada se separa el 50% de los residuos agrícolas que traen del campo. Como promedio es posible recolectar 3,75 t de RAC por hectárea de caña cosechada equivalentes a 0,62 tce (toneladas de combustible equivalentes 37.5 MJ/kg). **(Reyes, 2003)**

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

La mayor parte del bagazo producido en la industria azucarera es utilizado para generar el vapor requerido para los procesos de la fabricación de azúcar, con este propósito es utilizado cerca del 92% del bagazo generado en la fábrica de azúcar **(Baudel y col. 2005).**

El bagazo de caña de azúcar constituye uno de los principales recursos cuyo aprovechamiento integral y eficiente ofrece perspectiva para el desarrollo del país, para un rendimiento de 60 t/ha. año. En las condiciones de Cuba, para producir 1 tonelada de azúcar es necesario moler unas 8,5 toneladas de caña las cuales producen unas 2,2 toneladas de bagazo) con una humedad que oscila entre 48 y el 50 % y una cantidad considerable de residuos agrícolas cañeros (RAC). El bagazo como combustible es poco eficiente por su alto contenido de humedad, pero en Cuba es la principal biomasa, dada la gran cantidad que se produce anualmente durante el periodo de zafra. Desde el punto de vista del aprovechamiento energético del bagazo, su uso integral y eficiente en una zafra permite obtener el equivalente de 400 kg de fuel oíl por cada tonelada de azúcar producida. http://www.ecured.cu/index.php/Biomasa

1.6.1-Caracterización del bagazo como combustible

El bagazo ha sido utilizado históricamente como combustible en la industria azucarera, y aún cuando su valor calórico es relativamente bajo (1 850 Kcal/kg) **(Diez, 2012)**, al ser comparado con otros combustibles fósiles tradicionales, no hay duda de que constituye un valioso potencial energético, sobre todo, para aquellos países que no tienen disponibilidades significativas de combustible, y a la vez son grandes productores de azúcar de caña.

1.6.1.1Composición física del bagazo

La composición física del bagazo (Tabla 1.1) está constituido por cuatro fracciones las cuales se muestran en la siguiente tabla y su magnitud relativa está en dependencia del proceso agroindustrial azucarero.

Tabla 1.1: Composición física del bagazo.

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

Fuente:(Gómez 2009)

La fibra representa aproximadamente el 45% en peso del bagazo, está compuesta de toda la fracción sólida orgánica, insoluble en agua, presente originalmente en el tallo de la caña, y que se caracteriza por su marcada heterogeneidad desde el punto de vista morfológico.

Los sólidos no solubles o fracción insoluble en agua, están constituidos principalmente por sustancias inorgánicas (piedras, tierra, materias extrañas) esta fracción, si bien pequeña, participa en la composición del bagazo y está grandemente influenciada por las condiciones del procesamiento agrícola de la caña, tipo de corte y de recolección.

Los sólidos solubles abarcan la fracción que se disuelve en agua, compuesta fundamentalmente por sacarosa, cuya extracción ulterior en el central no resulta económica, así como otros componentes químicos como ceras, en menor proporción. (Gómez 2009)

1.6.1.2-Composición Química del bagazo.

El carbono es el elemento principal de la parte combustible, pues es el que más calor desprende, ya que aunque el hidrógeno de forma específica por unidad de masa desprende más calor, se encuentra siempre en mucha menor cuantía y el azufre desprende poco calor durante su combustión. En la tabla 1.2 se presenta la composición química elemental del bagazo.

Tabla 1.2: Composición química del bagazo

Elementos químicos	Bagazo (%)
Carbono	47,00
Hidrógeno	6,50
Oxígeno	44,00
Cenizas	2,50
Azufre	0,00
Nitrógeno	-

Fuente: (Reyes 2003)

El oxígeno y el nitrógeno, como componentes de las sustancias combustibles, constituyen lastres orgánicos, ya que disminuyen la cantidad de elementos combustibles en dichas sustancias y por lo tanto disminuyen el calor liberado de forma específica, es decir, por unidad de masa.

El azufre constituye la impureza más perjudicial contenida en el combustible, pues provoca una intensa corrosión de las superficies de baja temperatura, dada por la presencia en los gases de la combustión de SO_2 y tal vez algo de SO_3 si las condiciones son favorables para su formación, lo que acarrea la formación de ácido sulfúrico que ataca el metal de las superficies de transferencia de calor.

El azufre también resulta perjudicial, desde el punto de vista de la contaminación ambiental, por sus gases sulfurosos que van a parar a la atmósfera, lo que debe ser combatido y significa gastos adicionales, en inversiones y/o durante la operación. **(Rubio 2000)**

1.6.1.3-Calor específico de combustión del bagazo.

El bagazo posee un bajo calor específico de combustión:

- Calor Específico de Combustión inferior CECI= 17 294 – 18 938 kJ/kg
- Calor Especifico de combustión Superior CECI= 18 900 – 19 655 kJ/kg

Esta variación se debe a los cambios en la composición elemental y en el contenido de azúcar; a su vez la composición elemental se ve influida por la variedad y la edad de la caña, el suelo y el grado de mecanización de la cosecha.

En la variación en el contenido de azúcar influye el ajuste de los molinos y la cantidad y temperatura del agua de imbibición que se suministre al bagazo durante la molida.

1.6.1.4-Contenido de humedad.

Esta es la propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor. Cuando el trabajo de los molinos es deficiente, el contenido de humedad del bagazo será de aproximadamente del 50 % **(Hugot 1980);** mientras que con un buen trabajo su contenido será de 48 %; normalmente oscila en un rango estrecho 44-50 %.

1.6.1.5-Contenido de Cenizas.

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2,8 % de cenizas; y los residuos agrícolas cañeros, 9,5 aproximadamente. Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0,78 y 3,22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección. Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña.

Tabla 1.3: Contenido de la ceniza del bagazo

Compuesto químico	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O+Na_2O (%)	P_2O_5 (%)	MnO (%)
%	82,7	1,1	3,4	3,0	3,5	4,6	1,7	-

1.6.1.6-Granulometría.

La granulometría depende mucho del grado de preparación que tenga la caña en su proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras y molinos, así como su calidad; al aumentar aquellos aumentará el contenido de finos como resultado de la preparación de la fibra. La presión y el grado de desgaste de los molinos son dos factores muy importantes que se deben ir controlando durante la zafra, pues influyen en la granulometría del bagazo.

Una de las características más importantes de las biomasas cuando van a ser usadas en reactores de lecho fluidizado, es tener una dimensión uniforme y lo más pequeña posible. En el caso del bagazo, este presenta una característica muy singular: un mismo diámetro del bagazo presenta longitudes muy variadas, ya que existen partículas en forma de fibras muy alargadas y partículas fibrosas pero más cortas, cualidades que lo convierten en un material muy polidisperso.

1.6.2-Caracterización de los RAC como combustible.

Los residuos agrícolas cañeros (RAC) han cobrado en los últimos años un gran interés como material combustible para los centrales azucareros, con el objetivo de eliminar el petróleo y la leña como combustibles adicionales o para ahorrar bagazo y suministrarlo como materia prima a otras industrias, también han servido para suplir déficit energéticos en los centrales producto de inestabilidades en la molida. Adicionalmente constituyen un extraordinario potencial para la generación de electricidad en los propios ingenios o en centrales termoeléctricas.

Los RAC tienen tres fuentes fundamentales de origen:

- Centros de acopio de caña para su procesamiento (corte y limpieza) y trasbordo a carros de ferrocarril.
- Centros de limpieza donde a la caña se le quita la paja (limpieza) y se trasborda a carros de ferrocarril.
- Recolección directa en el campo.

Los RAC están constituidos por las hojas verdes y secas de la caña y por pedazos de su tallo. En su estado original no pueden ser utilizados como combustible, pues sus partes

constituyentes son demasiado largas para ser asimiladas por los conductores de bagazo a las calderas y además, se atascan en los embudos a través de los cuales cae el bagazo desde los conductores hasta el horno, por ello, para su suministro a las calderas los RAC deben ser picados, generalmente hasta una granulometría similar a la del bagazo, esto se consigue mediante juegos de cuchillas y molinos cañeros típicos, aunque la tendencia actual en el diseño de las instalaciones procesadoras de RAC, es el empleo solo de cuchillas horizontales.

Cuando los RAC son recolectados para su envío al central azucarero, su transportación resulta más económica si se incrementa su densidad mediante comprensión.

Los RAC constituyen un combustible renovable cada año y su potencial - obteniéndolos en centros de acopio y limpieza - es equivalente a 0,12 millones de toneladas de combustible convencional, por cada millón de tonelada de azúcar crudo que se produzca. **(Rubio, 2000)**

Tabla 1.4: Composición Química de los RAC

Elementos químicos	Bagazo (%)
Carbono	48,28
Hidrógeno	5,55
Oxígeno	45,61
Cenizas	9,50
Azufre	0,13
Nitrógeno	0,43

Fuente: (Reyes 2003)

1.6.2.1-Calor específico de combustión.

El calor específico de combustión de los RAC es ligeramente inferior al del bagazo, para su masa seca oscila en: 14050 - 16760 kJ/kg

Los RAC normalmente se dejan secar varios días en las plataformas de los centros de acopio y limpieza antes de su envío al ingenio, por eso su humedad típica es alrededor del 20 %, en ese caso puede tomarse 12400 KJ/kg como un buen valor para cálculos ingenieriles.

1.6.2.2- Contenido de humedad.

La humedad del RAC es variable y disminuye con el tiempo de su recolección. Tomando como base un secado natural al sol en las plataformas de los centros de acopio, varía aproximadamente como sigue:

Tabla 1.5: Variación de la Humedad de los RAC con el tiempo de recolección

Tiempo (días)	0	1	2	3	4	5
W^P (% húmedad)	60	45	36	26	20	16

1.6.2.3-Contenido de ceniza.

El contenido de ceniza de los RAC es elevado, esto se debe a que las hojas tienen un alto contenido de sustancias minerales que utilizan en la fotosíntesis. Estos valoren oscilan entre 6 y 13 %. **(Rubio, 2000)**

1.6.3-Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera

En particular, la caña de azúcar exhibe índices más ventajosos que otros cultivos en cuanto al almacenamiento de energía proveniente de la radiación solar, como se aprecia en los aspectos siguientes:

- Es capaz de almacenar 1,7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1 % en campos bien atendidos con regadío.
- Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 t/ha, con un máximo teórico de 233 kg, que compara ventajosamente con otros cultivos.
- Para un valor calórico de 17 476 MJ/kg de materia seca (MS), con un contenido de materia seca de 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla al ingenio.

Como promedio pueden emplearse las siguientes relaciones de sustitución:

- 5,2 toneladas de bagazo, 50 % de humedad por tonelada de petróleo (39,7 MJ/kg).
- Una tonelada de bagazo equivale a 231 m^3 de gas natural.
- Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja 30 % de humedad: 11,7 MJ/kg).
- El valor calórico del bagazo (50% humedad) es de 7,64 MJ/kg, semejante al de la madera: 7,9 MJ/kg. **(Reyes 2003)**

La biomasa desempeña un papel importante en la reducción de la concentración de CO2 de dos formas: como reservorio de carbón, absorbiendo CO2 en su propio desarrollo, y como sustituto de combustibles fósiles al ser usada como fuente energética.**(Pérez, 2005)**

En el proceso de su combustión se emiten determinadas cantidades de CO2 al medio ambiente. Sin embargo durante el proceso de crecimiento de las plantaciones renovadas, se absorbe igual cantidad de CO2 que la admitida en el proceso de combustión. Solo puede asegurarse un aprovechamiento sostenible de la biomasa, cuando el ciclo de producción y extracción de esta es continuo, o sea, se renuevan o incrementan las plantaciones con el objetivo de neutralizar las emisiones de gases de efecto invernadero durante su combustión.

1.6.4-Otras fuentes de biomasa.

Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Este es el caso de los bosques naturales y las plantaciones energéticas en desarrollo o sea la explotación forestal.

La leña es otro de los combustibles fósiles que pueden ser usados en la caldera como combustible. El valor calórico neto de la celulosa es más o menos constante y cercano a 4 250 Kcal/Kg. Sin embargo, el agua que contiene las diferentes maderas varía de acuerdo considerablemente de acuerdo con la especie y el tiempo que ha pasado después de cortadas.

La leña muy seca contiene el 20 % de agua, la leña seca el 30 % y la leña verde del 40 al 50%. La leña que se quema tiene generalmente entre el 30 y el 40 % de agua. Ciertas leñas son muy superiores a otras como combustible. Puede tomarse aproximadamente para la leña:

Leña común, moderadamente seca: VCN 2 500 Kcal/kg
Casuarina: moderadamente seca: VCN 3 250 Kcal/kg **(Espinosa, 1990).**

1.6.4.1-Marabú

Actualmente los campos de Cuba se hallan infectados con una especie de arbusto que por su rápida difusión en la isla representa un problema, su nombre científico es el de Dichrostachys cinérea pero es conocida popularmente como Marabú.

El marabú es un árbol pequeño o arbusto leñoso con espinas que pueden alcanzar hasta 8 cm de largo. Es de rápido crecimiento y su altura promedio es de 2.5 a 6 metros de altura en forma de matorrales espesos e impenetrables. **(Naranjo 2012)** En las imágenes que se muestran a continuación, se aprecia una planta común de marabú

Figura 1.1: Imágenes de un arbusto de marabú

En los últimos 150 años se ha convertido en la planta que más ha proliferado en Cuba y se estima que existen de 1.14 millones hectáreas cubiertas por este arbusto, afectando al 56% de las áreas ganaderas. Muchos lugares naturales y seminaturales han sido invadidos por el marabú y han perdido sus formaciones vegetales nativas.
http://www.ecured.cu/index.php/Marab%C3%BA.

A pesar de su enorme impacto ambiental negativo en Cuba, el marabú resulta útil en algunos aspectos. Protege grandes áreas de suelos desprovistos de vegetación natural contra la erosión, sobre todo en las franjas hidrorreguladoras de las cuencas fluviales. Por su impenetrabilidad, resulta positiva como refugio para especies nativas de la fauna afectadas por especies depredadoras introducidas o de la caza furtiva. Su madera es muy dura, duradera, inmune al ataque de hongos e insectos, de alta densidad.
También son reportados las propiedades medicinales de su corteza y frutos como antiséptico y que toda la planta es rica en taninos por lo que debe ser buen astringente **(Roig, 1974).** El marabú en Cuba, por su extensión, puede ser fuente de biomasa para combustible sólido con un rendimiento de 37 t/ha **(Naranjo, 2012).**

1.7-Cogeneración

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

pueden combinar la producción de electricidad y calor para los procesos, aprovechando la energía que de otra forma se desecharía, como ocurre en las centrales termoeléctricas convencionales; a esta forma de aprovechar el calor de desecho se le conoce como cogeneración.

La cogeneración a nivel industrial se realiza siguiendo el ciclo termodinámico de Rankine, el ciclo está compuesto por cuatro equipos, cuyas características se discuten a continuación:

1. Generador de vapor: Compuesto por un horno que quema el combustible (adquirido o de algún subproducto del proceso) que suministra la energía necesaria y una caldera que transforma el fluido de trabajo en vapor (agente transmisor de la energía). El fluido de trabajo más común usado en el Ciclo de Rankine es el agua. La caldera es un equipo que trabaja a presión constante.
2. Turbina: Equipo que transforma el alto contenido energético del vapor proveniente de la caldera en trabajo mecánico. Puede acoplarse a un generador eléctrico (turbogenerador). Este equipo trabaja prácticamente en condiciones adiabáticas.
3. Condensador: Termina la condensación del vapor de agua que pudo haber comenzado en la turbina. Como equipo usado para el calentamiento y los cambios de fase, al igual que la caldera, trabaja en condiciones de presión constante.
4. Bomba: Impulsa el agua para su entrada a la caldera. Su comportamiento se aproxima al de un equipo que trabaja en condiciones adiabáticas. **(Estupiñan, 2013)**

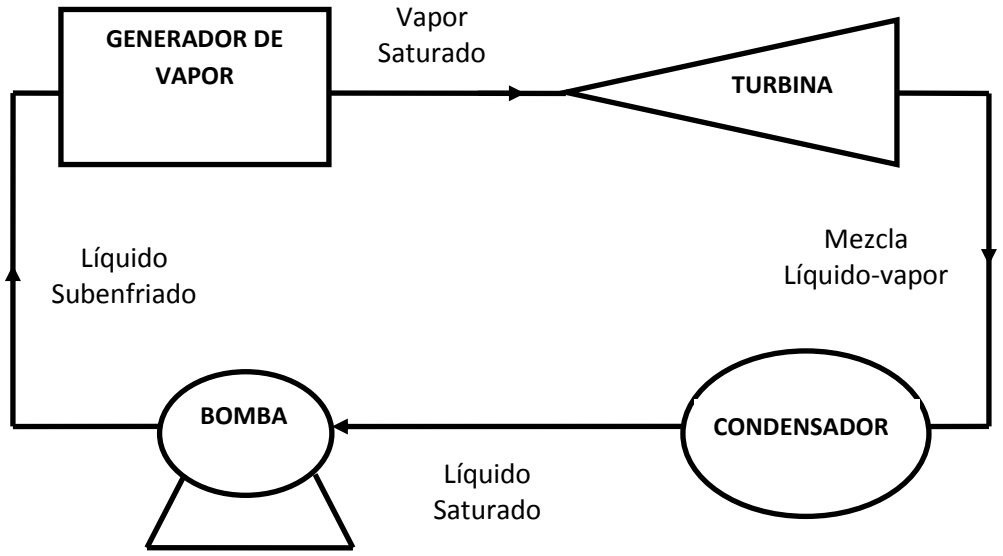


Figura 1.2: Esquema *del Ciclo de Rankine*

1.7.1-Generadores de Vapor.

El generador de vapor es un equipo que tiene la función de producir vapor para ser utilizado en la generación de energía mecánica, eléctrica y para la alimentación a equipos tecnológicos industriales. En la actualidad este equipo es un elemento fundamental en el funcionamiento de prácticamente todas las industrias modernas, esta es la razón por la que se ha llegado a plantear que el generador de vapor es el corazón de toda industria moderna.

1.7.1.1-Características de los generadores de Vapor

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

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

El incremento de la eficiencia en el generador de vapor es una necesidad de los procesos energéticos, pues los mismos en la actualidad presentan valores muy bajos, baste decir que de la energía del combustible al degradarse y una parte perderse por ineficiencia en los generadores de vapor, las turbinas, los generadores eléctricos, las líneas de transmisión, los transformadores, los motores eléctricos y los equipos mecánicos, el hombre sólo puede convertir en trabajo útil entre un 12 y un 30 %, lo que significa que la mayor parte de ella se pierde. **(Rubio, 2000)**

1.7.1.2-Clasificación de los Generadores de Vapor

No existe un criterio único para la clasificación de los generadores de vapor, dada la gran diversidad de tipos, formas y variantes: sin embargo, existen varios índices que pueden ser tomados como base de clasificación. Así, los generadores de vapor se pueden clasificar de la forma siguiente:

1. De acuerdo con sus usos , en estacionarios y móviles: los estacionarios son los que se instalan sobre un lugar fijo y se utilizan para generar vapor para las plantas generadoras de fuerza y para servir de medios de calentamiento, mientras los móviles son unidades compactas utilizadas en locomotoras, barcos, etcétera.
2. De acuerdo con la presión del vapor generado en:
   a) De bajas presiones (hasta 1.08 MPa); se usan generalmente para fines de calentamiento.
   b) De medias presiones(desde 1.08 hasta 4.02 MPa)
   c) De altas presiones (más de 4.02 MPa)

   Las calderas de alta y medias presiones se destinan a la generación de vapor para plantas de fuerza, aunque existen plantas de fuerza con calderas de menos de 1.08 MPa.
3. De acuerdo con los materiales de que están construidos, en :
   a) De acero(plantas de fuerza);
   b) De hierro colado usados en sistemas de calefacción.
   c) De cobre.
4. De acuerdo con el fluido que circula por los tubos, en :
   a) De tubos de fuego, de humo o pirotubulares; son calderas de tubos rectos a través de las cuales circulan los gases calientes productos de la combustión, mientras que el agua rodea los tubos y todo el conjunto está contenido en una carcasa generalmente de forma cilíndrica.
   b) De tubos de agua o acuotubulares; son calderas tales que el agua y el vapor circulan por el interior de los tubos, mientras que los gases o las llamas pasan por el exterior de los tubos o superficies de calentamiento.
5. De acuerdo con la forma y posición de los tubos. Según la forma de los tubos, las calderas pueden ser tubos rectos y de tubos curvos. Según la posición de los tubos, las calderas pueden ser de tubos horizontales, verticales, inclinados o angulares, y de posición sinuosa o variada.
6. De acuerdo con la dirección de los gases productos de la combustión las calderas pirotubulares pueden ser de tubos directos o con retorno tubulares.
7. De acuerdo con la posición de los domos con respecto a la posición de tubos o fluses, las calderas acuotubulares pueden ser de domos horizontales y de domos verticales; el número de domos varía de 2 a 5, siendo las más comunes de 2 y 3 domos.
8. De acuerdo con la posición del hogar o cámara de combustión con respecto a la caldera, pueden ser :

a) De hogar interior o exterior, en las pirotubulares.
b) De hogar inferior o situado en la base del horno, inmediatamente debajo de la fluseria, en las acuotubulares.
c) De hogar inferior-anterior en la base del horno, pero no necesariamente debajo de la caldera en las acuotubulares.
d) De hogar inferior situado e la parte frontal o anterior, o inferior situado en la parte posterior, en calderas acuotubulares de hogar exterior.

9. De acuerdo con la circulación de agua dentro de los tubos de las calderas se clasifican en de circulación libre o de corriente convectiva (diferencias de densidades), y de circulación forzada. **(Ponz, 1987)**

1.7.2-Turbinas de vapor

La turbina de vapor es una máquina de fluido en la que la energía de éste pasa al eje de la máquina saliendo el fluido de ésta con menor cantidad de energía. La energía mecánica del eje procede en la parte de la energía mecánica que tenía la corriente y por otra de la energía térmica disponible transformada en parte en mecánica por expansión. Esta expansión es posible por la variación del volumen específico del fluido que evoluciona en la máquina. **(Fernández, 2003)**

Las turbinas están compuestas por dos parte fundamentales una es el estator que como su nombre lo indica es un elemento estático o fijo **(Ponz, 1987)**. El estator está formado por una serie de toberas o alabes fijos, a través de los cuales se produce la expansión del vapor.

La otra parte es el rotor que es la parte móvil del equipo la cual gira dentro del estator, aquí se convierte la energía que desprende el vapor en energía mecánica, el rotor está compuesto por una serie de coronas de alabes, uno por cada escalonamiento de la turbina.

1.7.2.1-Clasificación de las turbinas de vapor

Las turbinas de vapor se pueden clasificar según diferentes parámetros, fundamentalmente se consideran dos como principales.

1. Según el principio de funcionamiento se clasifican en :
   a) Turbinas de acción: funcionan según el principio de acción. El vapor entra por un extremo del estator y se expansiona a través de las toberas o álabes. Aquí se convierte la energía térmica en cinética, siendo extremadamente elevada la velocidad del vapor a la salida. El vapor a altas velocidades pasa al sistema de álabes del rotor donde

experimenta una variación de la cantidad de movimiento. El impulso ejercido sobre los álabes proporciona la fuerza tangencial que obliga al rotor a girar contra la resistencia de la carga mecánica acoplada a su eje. En este tipo de turbina toda la expansión tiene lugar en las toberas (o en los álabes fijos) y no hay expansión en los álabes móviles del rotor. La caída de presión ocurre toda en las toberas o álabes del estator y la presión permanece constante en los álabes móviles.

b) Turbinas de reacción: funcionan de acuerdo al principio de acción y reacción. Se construyen de forma tal que la sección recta entre los álabes móviles no es constante, lo que provoca que continúe la expansión en los álabes del rotor. Estas turbinas de forma pura no se construyen, sino se hacen híbridos con otras variantes.

c) Turbinas mixtas: contienen más de un cilindro, por lo que el equipo queda dividido en varias secciones. Las secciones de presión alta y media funcionan como turbinas de acción y las de baja presión funcionan como turbinas de reacción. **(Estupiñán, 2013)**

2. Según su utilización las turbinas se clasifican en :

a) Turbinas de condensación directa: son aquellas en las que todo el vapor vivo que entra al equipo , después de expandirse, pasa al condensador

b) Turbinas de toma intermedia: están constituidas por dos secciones, la sección de alta presión y la sección de baja presión montadas ambas máquinas sobre un eje común. El vapor vivo entra a la sección de alta presión, donde se expande hasta la presión intermedia: en este punto una parte del vapor se extrae para pasar a la planta de proceso y, el resto se expande en la sección de baja presión. El vapor de escape de la turbina y el procedente de la planta de proceso, pasan a un condensador, y el agua condensada pasa de nuevo a la caldera mediante una bomba. Este tipo de turbina es muy empleado en aquellas industrias donde se emplea una gran cantidad de vapor para necesidades del proceso, para evaporación, cocción, etcétera, y donde además hay demanda de fuentes de energía.

c) Turbina de contrapresión: produce energía mecánica y todo el vapor de escape pasa a la planta de proceso. La turbina de contrapresión gasta menos y su construcción es más sencilla.

d) Turbinas de vapor de escape: reciben el vapor que sale de la máquina, el cual se expande en su interior hasta la presión del condensador, con lo que se aprovecha un trabajo o que de otra forma se perdería.

e) Turbinas de dos presiones: esta turbina recibe el vapor de escape de una máquina a una presión intermedia entre la de entrada y la de escape de la turbina. Esta turbina es

parecida a la de toma intermedia, solo que en la primera el vapor en la presión media entra a la turbina, mientras que en la segunda sale **(Ponz, 1987)**

1.7.3-Condensación

La condensación es el fenómeno físico que describe el cambio de vapor a líquido. Las cantidades de calor involucradas en la condensación o vaporización de una libra de fluido son idénticas. Para fluidos puros a una presión dada, el cambio de líquido a vapor o de vapor a líquido ocurre sólo a una temperatura, que es la temperatura de saturación o de equilibrio. Si se condensa una mezcla de vapores en lugar de un vapor puro, a presión constante, en muchos casos los cambios no tienen lugar isotérmicamente. (**Kern, 1999)**

La condensación puede ocurrir por diferentes mecanismos físicos, cuando un vapor saturado entra en contacto con una superficie fría como la superficie de un tubo este comienza a condensar y puede formarse pequeñas gotas sobre la superficie del tubo. Si estas gotas no presentan ninguna afinidad por la superficie, y descienden, en vez de recubrir el tubo, quedando la superficie libre para la formación de nuevas gotas se le llama *condensación por gotas*. Por otra parte pudiera aparecer una película que cubre la superficie del tubo según va condensando el vapor necesitándose una cantidad adicional de vapor para poder condensar en la película de condensado en vez de hacerlo sobre la superficie del tubo esta condensación es conocida en *forma de película.*

1.7.3.1-Tipos de Condensadores

Los condensadores pueden ser de superficie o de mezcla.

a) Condensadores de superficie:

El agua fría va a circular por los tubos y el vapor por el exterior de estos buscando mayor área de transmisión de calor. El diseño busca minimizar las pérdidas de carga debidas al paso del vapor y aprovechar el intercambio entre el líquido ya condensado y el vapor. Parte del vapor puede utilizarse para volver a calentar el condensado a la salida, creando así un poco de

Regeneración (el agua que retorna a la caldera esta menos fría que lo estaba al condensar)

b) Condensadores de mezcla:

Cuando, aparte de la turbina, hay otros usos del vapor que hacen necesario reponer una cantidad sustancial de agua, pueden utilizarse condensadores de mezcla, en los que el vapor condensa por contacto con el agua fría.

1.7.4-Bombas.

Se denominan bombas a las maquinas hidráulica que transforman la energía mecánica de un motor en energía de un fluido, con un aumento de la presión. El transporte del líquido se basa en la diferencia de presión entre la bomba y la tubería. De acuerdo con su constitución o forma las bombas se pueden clasificar en: de desplazamiento positivo o volumétricas, centrífugas o de álabes, de turbinas o de torbellinos y de flujo axial.**(Rosabal, 2006)**

Las bombas centrífugas son las más usadas en la actualidad pues estas pueden bombear grandes cantidades de líquidos y pueden alcanzar altas presiones de bombeo. En las bombas centrífugas la aspiración e impulsión del fluido se produce por las fuerzas centrífugas que surgen de la rotación del rodete de álabes encerrados en el cuerpo de la bomba.

1.7.4.1-Clasificación de las bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas pueden ser agrupadas en distintos tipos en función del diseño, construcción, servicio, etc. por lo que una bomba en particular puede pertenecer simultáneamente a dos o más grupos a la vez; algunos de estos grupos son los siguientes, a saber:

- Basados en el cumplimiento con normas de la industria
- Basado en el número de rotores o rodetes
- Basado en la succión del rotor o rodete
- Basado en el tipo de voluta
- Basado en la ubicación de las conexiones
- Basada en la orientación del eje
- Basado en la orientación de la división de la carcasa
- Basado en el soporte de los rodamientos
- Basada en la orientación del eje
- Basado en la orientación de la división de la carcasa
- Basado en el soporte de los rodamientos
- Basado en la conexión del eje al accionamiento
- Basado en el tipo de servicio

1.8-Manejo de la energía térmica en el proceso de fabricación de azúcar.

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

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

Las tareas a ejecutar para garantizar la modernización de los ciclos termodinámicos eficientes están dadas por el uso de residuos cañeros (RAC) como combustible, la generación de energía eléctrica todo el año, la racionalización de los consumos propios de energía eléctrica contrarrestando el sobredimensionamiento, la sustitución de equipos de transferencias de calor por otros que garanticen la disminución de los consumos de vapor de escape en el proceso, y el aumento de la eficiencia de la planta de generación de vapor, etcétera.

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

1.9-Conclusiones Parciales

1. El término biomasa incluye toda la materia orgánica que tiene su origen inmediato en un proceso biológico y que puede ser convertida en energía. Como recurso energético, puede clasificarse en biomasa natural, residual y los cultivos energéticos.

2. Para ser usada la biomasa debe transformarse empleando métodos termoquímicos o biológicos lo cual permite su utilización en la generación de calor, frío, electricidad o para la transportación.
3. El empleo de la biomasa como fuente de energía renovable contribuye a reducir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera pues al efectuarse su combustión, el mismo CO_2 empleado durante su crecimiento es emitido en el proceso, comportándose como un ciclo cerrado.
4. En Cuba el bagazo de caña de azúcar y los recursos forestales constituyen uno de los principales recursos biomásicos lo cual los convierte en importantes fuentes energéticas renovables y no contaminantes con posibilidades reales para incrementar la generación eléctrica del país.
5. Para poder aumentar los índices actuales de generación eléctrica de la industria azucarera cubana es necesario efectuar cambios tecnológicos que permitan aprovechar las amplias potencialidades de los recursos biomásicos que tiene a su disposición.

2. Capítulo II.

2.1. Caracterización energética de la Empresa

La fábrica de azúcar pertenece a la Empresa Azucarera “Antonio Sánchez” del municipio de Aguada de Pasajeros, provincia Cienfuegos. Esta Empresa geográficamente limita al sur con la Ciénega de Zapata, al norte con la Empresa Agropecuaria “Primero de Mayo”, al este con el plan de cultivos varios de Horquita y al oeste con el plan arrocero del sur, provincia de Matanzas y el poblado de Aguada de Pasajeros, cabecera del municipio.

La Fábrica de azúcar tiene una capacidad de molida de 3680 t/d (320 000 arrobas diarias), la caña es preparada por dos juegos de cuchillas los cuales necesitan un alto consumo de potencia para realizar su trabajo, la molida se realiza por un tándem formado por cinco molinos Fulton inclinado, un sistema de bombas intupibles y colador rotatorio, lo cual garantiza la separación de los residuos de bagazo disueltos en el guarapo. La generación de vapor se produce en 2 calderas Retal de 60tn/h cada una, con un índice de consumo de bagazo teórico de 2,26 ton vapor/ton bagazo, que utilizan el bagazo como combustible para producir el vapor que demanda la generación eléctrica la cual se realiza en dos turbos generadores de contrapresión, uno de 4000 kW y otro de 2500 kW con un índice de consumo de vapor teórico de 11,32 Kg./kWh respectivamente para un total de 6500 kW que satisface las necesidades de la Industria, con posibilidades de entregar el excedente al SEN.

La estación de purificación está formada por una batería de 5 calentadores y un clarificador. La concentración del jugo se realiza en dos pre-evaporadores que utilizan el vapor de escape de los turbogeneradores para producir el vapor que demanda el cuádruple efecto y los tachos. El proceso de producción de azúcar demanda de un alto consumo de portadores energéticos fundamentalmente del bagazo para la producción de vapor, energía eléctrica directamente.

2.2. Valoración de diferentes escenarios futuros.

Para las condiciones actuales de operación del central se han realizado los balances de masa y energía necesarios para definir los principales parámetros de operación relacionados con la producción y consumo de energía térmica así como la generación eléctrica. Han sido propuestas dos alternativas para el incremento en la generación de energía eléctrica, para esto se requiere de algunos cambios tecnológicos, en el área de generación eléctrica se propone cambiar el turbogenerador de contrapresión existente por un turbogenerador de extracción-condensación de 15 MW y en el área de generación de vapor se propone cambiar la caldera existente por una caldera de alta presión, a continuación se explican detalladamente ambas variantes.

Variante 1

Durante esta variante se considera la generación de electricidad por períodos, primeramente se generará electricidad normalmente en época de zafra usando el bagazo del proceso azucarero, al finalizar la zafra se continuará generando electricidad con el bagazo sobrante de la zafra, posteriormente se generará con bagazo sobrante de la zafra del central Caracas y por último se continuará la generación con los residuos agrícolas cañeros (RAC) recuperados en los centros de limpieza.

Variante 2

La variante 2 difiere de la variante 1 en que después que se use los RAC como combustible se continuará la generación eléctrica durante un período de tiempo en que se usará como combustible el marabú de las zonas cercanas al central.

2.3. Balance de masa y energía en las condiciones actuales.

Durante este análisis se considerará la generación eléctrica en tiempo de zafra, se supondrá operación del Central en condiciones estables y eficientes (bajo tiempo perdido), con la máxima razón de molida por hora

Tabla 2.1 Datos Para el balance de Masa

Caña Molida t/d	3680	% Brix Jugo clarificado	14,45
Bagazo % caña	36	% Brix de la meladura	65
% extracción en los molinos	100	% Brix salida del Primer Pre	21
Cachaza t/d	147,2	% Brix salida del Segundo Pre	27
% Humedad del bagazo	48,2	Floculante	18,4
% Brix Jugo mezclado	14,82		

2.3.1.Balance Total en los Molinos

Base de cálculo: 1 día

Caña + Agua $_{(imb)}$ = Bagazo + Jugo $_{(mez)}$

Cálculo de la cantidad de bagazo:

$$\text{Bagazo \% caña} = \frac{\text{Bagazo}}{\text{caña}} * 100$$

$$\text{Masa de bagazo} = \frac{\text{bagazo \% caña} * \text{caña}}{100}$$

$$\text{Masa de bagazo} = \frac{36 * 3680\ \text{t}}{100}$$

$$\text{Masa de bagazo} = 1324{,}8\ \frac{\text{t}}{\text{d}} = 55200\ \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Cálculo de la cantidad de Jugo de los molinos:

$$\%\,\text{Ext molinos} = \frac{\text{jugo de molinos}}{\text{caña}} * 100$$

$$\text{Jugo de molinos} = \frac{\%\,\text{Ext molinos} * \text{caña}}{100}$$

$$\text{Jugo de molinos} = \frac{100 * 3680\ \text{t}}{100}$$

$$\text{Jugo de molinos} = 3680\ \frac{\text{t}}{\text{d}} = 153333{,}33\ \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Cálculo del agua de imbibición:

$$\text{Agua de imbibición} = (\text{bagazo} + \text{jugo de molinos}) - \text{caña}$$

$$\text{Agua de imbibición} = (1324{,}8 + 3680) - 3680$$

$$\text{Agua de imbibición} = 1324{,}8\ \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

2.3.2. Balance en la estación de purificación.

Cálculo de la cantidad de jugo de los filtros

$$\text{Jugo de los Filtros} = 15\% * \text{JMolinos}$$

$$\text{Jugo de los Filtros} = 0{,}15 * 3680\ \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

$$\text{Jugo de los Filtros} = 552\ \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

Balance Total en el tanque de Jugo Mezclado

$$\text{Jugo del tanque mezclado} = \text{Jugo del filtro} + \text{Jugo de los Molinos}$$

$$\text{Jugo del tanque mezclado} = 552 + 3680\,\frac{t}{d}$$

$$\text{Jugo del tanque mezclado} = 4232\,\frac{t}{d}$$

$$\text{Jugo del tanque mezclado} = 176333{,}33\,\frac{Kg}{h}$$

Cálculo de la lechada de cal

La base de cálculo es 1 día

4ºBe $\rightarrow \rho = 1{,}029$ Kg/l

36 g (CaO) $\rightarrow$ l de lechada

500 g (CaO) $\rightarrow$ 1 t caña

$$m(CaO) = 500\,\frac{g}{t} * 3680\ t = 1840000\,g = 1840Kg$$

$$V(CaOH) = 1840000\,g * \frac{1L}{36g} = 51111{,}11L$$

$$\rho(CaOH) = \frac{m(CaOH)}{V(CaOH)}$$

$$m(CaOH) = \rho(CaOH) * V(CaOH)$$

$$m(CaOH) = 1{,}029\,\frac{kg}{l} * 51111{,}11$$

$$m(CaOH) = 52593{,}33\,kg = 52{,}593t$$

Balance Total de masa en el Tanque Flash

$$\text{Jugo alcalizado} = \text{Jugo mezclado} + \text{Lechada de cal}$$

$$\text{Jugo alcalizado} = 4232\ t + 52{,}593\ t$$

$$\text{Jugo alcalizado} = 4284{,}59\ \frac{t}{d}$$

$$\text{Jugo a calentadores } 2,3,4 = 4284{,}59\ t = 178524{,}72\,\frac{kg}{h}$$

Cálculo de la cantidad de Floculante (Fte)

$$Fte = \frac{\text{Caña molida (Cm)} * \text{Dosificación(Df)}}{1000}$$

$$Fte = \frac{3680 * 5}{1000}$$

$$Fte = 18{,}4\,\frac{kg}{d} = 0{,}0184\,\frac{t}{d}$$

Balance Total de masa en el Clarificador

$$\text{Jugo que entra al clarificador} = \text{Jugo alcalizado} + \text{Floculante}$$

$$\text{Jugo que entra al clarificador} = 4284{,}59\ t + 0{,}0184\ t$$

$$\text{Jugo que entra al clarificador} = 4284{,}6117\,\frac{t}{d}$$

Balance Total de masa en el filtro

$$lodo = cachaza + \text{Jugo de los Filtros}$$

$$lodo = 147{,}2\ t + 552t$$

$$lodo = 699{,}2\,\frac{t}{d}$$

Cálculo de la masa de jugo claro

$$\text{Jugo que entra al clarificador} = \text{Jugo claro} + lodo$$

$$\text{Jugo claro} = \text{Jugo que entra al clarificador} - lodo$$

$$\text{Jugo claro} = 4284{,}6117\,\frac{t}{d} - 699{,}2\,\frac{t}{d}$$

$$\text{Jugo claro} = 3585{,}41\frac{t}{d} = 149392{,}15\,\frac{kg}{h}$$

$$\text{Jugo claro} = \text{Jugo al Calentador 1}$$

2.3.3. Balances en la estación de evaporación.

Balance Parcial de sólidos en el Pre-evap 1

$$\text{Jugo clarificado} * Bx_{ent} = \text{Jugo Salida 1} * Bx_{sal1}$$

$$\text{Jugo Salida 1} = \frac{\text{Jugo clarificado} * Bx_{ent}}{Bx_{sal1}}$$

$$\text{Jugo Salida 1} = \frac{149392{,}15 * 14{,}45}{21}$$

$$\text{Jugo Salida 1} = 102796{,}03\,\frac{kg}{h}$$

Balance Parcial de sólidos en el Pre-evap 2

$$\text{Jugo Salida 1} * Bx_{sal1} = \text{Jugo Salida 2} * Bx_{sal2}$$

$$\text{Jugo Salida 2} = \frac{\text{Jugo salida 1} * Bx_{sal1}}{Bx_{sal2}}$$

$$\text{Jugo Salida 2} = \frac{102796{,}03 * 21}{27}$$

$$\text{Jugo Salida 2} = 79952{,}4684 \frac{kg}{h}$$

Balance de Masa en los Pre-evaporadores

$$\text{Jugo clarificado} = \text{Vapor producido} + \text{Jugo salida del Pre - evap 2}$$

$$\text{Vapor producido} = \text{Jugo clarificado - Jugo salida del Pre - evap 2}$$

$$\text{Vapor producido} = 149392{,}15 \frac{kg}{h} - 79952{,}4684 \frac{kg}{h}$$

$$\text{Vapor producido} = 69439{,}68 \frac{kg}{h}$$

$$\text{Vapor producido} = \text{Extracción}$$

2.3.4. Balances de energía del proceso

Consumo de vapor de los Pre – Evaporadores

Tabla 2.2 Datos del Pre-evaporador

P (cal) Mpa	0,1
λ(cal) Kcal/kg	639
P(cuerpo) Mpa	0,06
λ (cuerpo) kcal/kg	633,77
Teb ºC	103
Talim ºC	108

Cálculo del Cp jugo

$$Cp = 1 - 0{,}0056\, Bx_{J.Clarif}$$

$$Cp = 1 - 0{,}0056\ (14.41)$$

$$Cp = 0{,}92 \frac{Kcal}{Kg°C}$$

Consumo de vapor del 1 Vaso del Cuádruple Efecto

$$G_{pre} = \left(\frac{S_{jugo} * C_{p_{jugo}} (t_{eb} - t_{alim})}{\lambda_{calandria}} + \frac{Ext * \lambda_{cuerpo}}{\lambda_{calandria}} \right) * x$$

$$G_{pre} = \left(\frac{149392{,}15 * 0{,}92(103 - 108)}{639} + \frac{69439{,}68 * 633{,}77}{639} \right) * 1{,}05$$

$$G_{pre} = 71186{,}83 \frac{kg}{h}$$

Calculando Cp de la meladura

$$Cp = 1 - 0{,}0056\ Bx_{Ent}$$
$$Cp = 1 - 0{,}0056\ (24{,}3)$$
$$Cp = 0{,}86\ \frac{Kcal}{Kg°C}$$

Determinando la Productividad

$$V_t = F\left(1 - \frac{Bx_{ent}}{Bx_{sal}}\right)$$
$$V_t = 79952{,}76 * \left(1 - \frac{27}{65}\right)$$
$$V_t = 46741{,}44\ \frac{kg}{h}$$

Consumo de vapor de Primer Vaso

$$G_{Vaso1} = \left(\frac{V_t}{n} * \frac{\lambda_{cuerpo}}{\lambda_{calandria}} + \frac{m_{jugo} C_p (t_b - t_f)}{\lambda_{calandria}}\right)$$
$$G_{Vaso1} = \left(\frac{46741{,}44}{4} * \frac{617{,}34}{633{,}77} + \frac{79952{,}46 * 0{,}86(105 - 103)}{633{,}77}\right) * 1{,}04$$
$$G_{Vaso1} = 12060{,}44\ \frac{kg}{h}$$

Economía en el Cuádruple efecto

$$e = \frac{V_t}{S}$$
$$e = \frac{46741{,}44}{12060{,}44}$$
$$e = 3{,}87$$

Consumo de vapor de los Calentadores

Calentador 1: (Trabaja con vapor de escape de los turbogeneradores)

Tabla 2.3 Datos del Calentador

Calentador # 1 (J Clarificado)	
Masa de J Clarificado Kg/h	149392,2
T (inic) ºC	95
T (final) ºC	108
P (vapor) Mpa	0,23
λ (vapor) kca/kg	523
Coeficiente de pérdidas	1,05

Cálculo de la capacidad calorífica (Cp)

$$Cp = 1 - 0{,}0056\ Bx_{J.Clarif}$$
$$Cp = 1 - 0{,}0056\ (14{,}45)$$
$$Cp = 0{,}92\ \frac{Kcal}{Kg°C}$$

Consumo de Vapor de Escape del Calentador 1

$$G_{cal1} = \frac{Q}{\lambda_{vap}}$$
$$G_{cal1} = \frac{S * C_p(t_f - t_i) * X}{\lambda_{vap}}$$
$$G_{cal1} = \left(\frac{149392{,}2 * 0{,}92(108 - 95)}{523}\right) * 1{,}05$$
$$G_{cal1} = 3578{,}74\ \frac{kg}{h}$$

Calentador 2: (Trabaja con agua caliente de los condensados)

Tabla 2.4 Datos del Calentador 2

Calentador # 2 (J Alcalizado) L-L	
Masa de J Alcalizado Kg/h	178524,7
T (inic) ºC	35
T (final) ºC	56
T (inic agua condensada) ºC	94
T (final agua condensada) ºC	55
Cp (agua cond)	1

Cálculo del Cp del jugo

$$Cp = 1 - 0{,}0056\ Bx_{JM}$$
$$Cp = 1 - 0{,}0056\ (14{,}82)$$
$$Cp = 1 - 0{,}0829$$
$$Cp = 0{,}917\ \frac{Kcal}{Kg°C}$$

Masa de agua condensada consumida

$$G_{cal2} = \frac{S * C_p(t_f \quad t_i)}{Cp * (T_{inic} \quad T_{fin})}$$
$$G_{cal2} = \frac{178524{,}7 * 0{,}917(56 \quad 35)}{1 * (94 \quad 55)}$$
$$G_{cal2} = 88150{,}78\ \frac{kg\ H_2O}{h}$$

Calentador 3: (Trabaja con vapor del Pre-evap)

Tabla 2.5 Datos del Calentador 3

Calentador # 3 (J Alcalizado)	
Masa de J Alcalizado Kg/h	178524,7
Cp (ja)	0,917008
T (inic) ºC	56
T (final) ºC	85
P (vapor) Mpa	0,06
λ (vapor) kcal/kg	548,8

Consumo de vapor del calentador 3

$$G_{cal3} = \frac{Q}{\lambda_{vap}}$$

$$G_{cal3} = \frac{S * C_p(t_f - t_i) * X}{\lambda_{vap}}$$

$$G_{cal3} = \left(\frac{178524,7 * 0,917(85-56)}{548,8}\right) * 1,05$$

$$G_{cal3} = 9083,32 \frac{kg}{h}$$

Calentador 4: (Trabaja con vapor de escape de los turbos)

Tabla 2.6 Datos del Calentador 4

Calentador # 4 (J Alcalizado)	
Masa de J Alcalizado (S) Kg/h	178524,7
Cp (ja)	0,917008
T (inic) ºC	85
T (final) ºC	105
P (vapor) Mpa	0,23
λ (vapor) kcal/kg	523,7

Consumo de vapor del calentador 4

$$G_{cal4} = \frac{Q}{\lambda_{vap}}$$

$$G_{cal4} = \frac{S * C_p(t_f - t_i) * X}{\lambda_{vap}}$$

$$G_{cal4} = \left(\frac{178524,7 * 0,917(105-85)}{523,7}\right) * 1,05$$

$$G_{cal4} = 6564,69 \frac{kg}{h}$$

Consumo de vapor de las Necesidades Tecnológicas

$$G_{NT} = G_{Pre\text{-}evap} + G_{Cal\ 1} + G_{Cal\ 4}$$

$$G_{NT} = 71186,83 + 3578,74 + 6564,59$$

$$G_{NT} = 81330,18 \frac{kg}{h}$$

Consumo de vapor de los Tachos

En los tachos, si el consumo de vapor se expresa como una relación entre este y la cantidad teórica de agua que debe evaporarse de la meladura, se verá que esta relación es sensiblemente mayor de 1. Esto se debe al agua que se emplea en la dilución de las mieles, al agua del lavado que se usa en las masas cocidas de alto grado, y al agua que se emplea para eliminar el falso grano, la suma de las cuales representa una cantidad adicional de agua que debe evaporarse junto con la presente en la meladura. **(Hugot, 1980)**

Para el consumo de vapor de los tachos se efectuaron los balances de masa para determinar la cantidad de agua evaporada del material inicial (pie de templa) y del material que se alimenta (meladura y miel) siguiendo la metodología que propone **(Espinosa, 1990)**

Calculo del Tacho 1: (Masa Cocida A)

Tabla 2.7 Datos del Tacho # 1

V inic (m^3)	13,23	Bx3 (masa A)	92,6
V final (m^3)	35,23	γ (volumen específico) kg/m^3	1450
Bx1 (semilla B)	90,06	t cocción (h)	1,6
Bx2 (meladura)	64,28	Coeficiente de perdidas φ	1,1

a-Masa del material inicial (Kg)

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$

$$W_{inic} = 19183,5\left(1 - \frac{90,06}{92,60}\right)$$

$$W_{inic} = 526,20kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$

$$P_{inic} = 1450 * 13,23$$

$$P_{inic} = 19183,5kg$$

c- Masa del material final (Kg)

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$

$$P_{fin} = 1450 * 35,23$$

$$P_{fin} = 51083,5kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$

$$P_{mat} = \left(51083,5 - 19183,5 - 526,20\right) * \frac{92,60}{64,28}$$

$$P_{mat} = 45196,23kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado

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

$$W_{mat} = 45196,23 * \left(1 - \frac{64,28}{92,6}\right)$$

$$W_{mat} = 13822,43kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho

$$G_{tacho1} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$

$$G_{tacho1} = \frac{526,20 + 13822,43}{1,6} * 1,1$$

$$G_{tacho1} = 9864,68\frac{kg}{h} * 40\%$$

$$G_{tacho1} = 3945,87\frac{Kg}{h}$$

Tacho 2: (Masa Cocida B)

Tabla 2.8 Datos del Tacho # 2 (Masa B)

V inic (m^3)	12,06	Bx3 (masa B)	93,8
V final (m^3)	39,08	γ (volumen específico) kg/m^3	1450
Bx1 (semilla C)	90,12	t cocción (h)	2,5
Bx2 (miel A)	62,08	Coeficiente de perdidas φ	1,1

a-Masa del material inicial (Kg)

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$
$$P_{inic} = 1450 * 12,06$$
$$P_{inic} = 17487kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$
$$W_{inic} = 17487 * \left(1 - \frac{90,12}{93,80}\right)$$
$$W_{inic} = 686,05kg$$

c- Masa del material final (Kg)

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$
$$P_{fin} = 1450 * 39,08$$
$$P_{fin} = 56666kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$
$$P_{mat} = (56666 - 17487 - 686,05) * \frac{93,80}{63,08}$$
$$P_{mat} = 58161,05kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right)$$
$$W_{mat} = 58161,05 * \left(1 - \frac{63,08}{93,80}\right)$$
$$W_{mat} = 19668,10kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho 2

$$G_{tacho2} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$
$$G_{tacho2} = \frac{526,20 + 13822,43}{1,6} * 1,1$$
$$G_{tacho2} = 9769,97\frac{kg}{h} * 45\%$$
$$G_{tacho2} = 4396,49\frac{Kg}{h}$$

Tacho 3: (Masa Cocida A)

Tabla 2.9 Datos del Tacho # 3

V inic (m^3)	16,99	Bx3 (masa A)	93,08
V final (m^3)	59,42	γ (volumen específico) kg/m^3	1450
Bx1 (semilla B)	89,8	t cocción (h)	2
Bx2 (meladuraA)	64,28	Coeficiente de perdidas φ	1,1

a-Masa del material inicial (Kg)

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$
$$P_{inic} = 1450 * 16,99$$
$$P_{inic} = 24635,5kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$
$$W_{inic} = 24635,5 * \left(1 - \frac{89,8}{93,08}\right)$$
$$W_{inic} = 868,11kg$$

c- Masa del material final (Kg)

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$
$$P_{fin} = 1450 * 59,42$$
$$P_{fin} = 86159kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$
$$P_{mat} = \left(86159 - 24635 - 868,11\right) * \frac{93,08}{64,28}$$
$$P_{mat} = 87831,40kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado.

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right)$$
$$W_{mat} = 87831,40 * \left(1 - \frac{64,28}{93,08}\right)$$
$$W_{mat} = 27176,02kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho 3

$$G_{tacho3} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$
$$G_{tacho3} = \frac{868,11 + 27176,02}{2} * 1,1$$
$$G_{tacho3} = 15424,26\frac{kg}{h} * 60\%$$
$$G_{tacho3} = 9254,56\frac{Kg}{h}$$

Tacho 4: (Ampliado o grano fino)

Tabla 2.10 Datos del Tacho # 4

V inic (m³)	10,03	Bx3 (masa ampliado)	92,5
V final (m³)	30,73	γ (volumen específico) kg/m³	1450
Bx1 (ampliado)	90,5	t cocción (h)	2
Bx2 (miel B)	66,2	Coeficiente de perdidas φ	1,3

a-Masa del material inicial (Kg)

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$
$$P_{inic} = 1450 * 10,03$$
$$P_{inic} = 14543,5kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$
$$W_{inic} = 14543,5\left(1 - \frac{90,50}{92,50}\right)$$
$$W_{inic} = 314,45kg$$

c- Masa del material final (Kg

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$
$$P_{fin} = 1450 * 30,73$$
$$P_{fin} = 44558,5kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$
$$P_{mat} = \left(44558,5 - 14543,5 - 314,45\right) * \frac{92,50}{66,20}$$
$$P_{mat} = 41500kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right)$$
$$W_{mat} = 41500\left(1 - \frac{66,20}{92,50}\right)$$
$$W_{mat} = 11799,46kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho 4

$$G_{tacho4} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$
$$G_{tacho4} = \frac{314,45 + 11799,46}{2} * 1,3$$
$$G_{tacho4} = 7874,04\frac{kg}{h} * 30\%$$
$$G_{tacho4} = 2362,21\frac{kg}{h}$$

Tacho 5: (Masa Cocida A)

Tabla 2.11 Datos del Tacho # 5

V inic (m^3)	12,06	Bx3 (Masa A)	92,75
V final (m^3)	36,22	γ (volumen específico) kg/m^3	1450
Bx1 (Semilla $_B$)	90,06	t cocción (h)	1,6
Bx2 (meladura)	64,28	Coeficiente de perdidas φ	1,1

a-Masa del material inicial

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$
$$P_{inic} = 1450 * 12{,}06$$
$$P_{inic} = 17487kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$
$$W_{inic} = 17487\left(1 - \frac{90{,}06}{92{,}75}\right)$$
$$W_{inic} = 507{,}17kg$$

c- Masa del material final

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$
$$P_{fin} = 1450 * 36{,}22$$
$$P_{fin} = 52519kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$
$$P_{mat} = \left(52519 - 17487 - 507{,}17\right) * \frac{92{,}75}{64{,}28}$$
$$P_{mat} = 49816{,}08kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right)$$
$$W_{mat} = 49816\left(1 - \frac{64{,}28}{92{,}75}\right)$$
$$W_{mat} = 15291{,}25kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho 4

$$G_{tacho5} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$
$$G_{tacho5} = \frac{507{,}17 + 15291{,}23}{1{,}6} * 1{,}1$$
$$G_{tacho5} = 10861{,}4\frac{kg}{h}$$

Tacho 6: (Ampliado)

Tabla 2.12 Datos del Tacho # 6

V inic (m³)	12,83	Bx3 (masa C)	95,8
V final (m³)	36,25	γ (volumen específico) kg/m³	1450
Bx1 (masa ampliado)	9,.5	t cocción (h)	5
Bx2 (meladura)	64,28	Coeficiente de perdidas φ	1,3

a-Masa del material inicial

$$P_{inic} = \gamma * V_{inic}$$
$$P_{inic} = 1450 * 12,83$$
$$P_{inic} = 18603,5kg$$

b- Agua Evaporada inicialmente

$$W_{inic} = P_{inic}\left(1 - \frac{Bx_1}{Bx_3}\right)$$
$$W_{inic} = 18603,5\left(1 - \frac{92,50}{95,80}\right)$$
$$W_{inic} = 640,83kg$$

c- Masa del material final

$$P_{fin} = \gamma * V_{fin}$$
$$P_{fin} = 1450 * 36,25$$
$$P_{fin} = 52562,5kg$$

d- Peso del material alimentado

$$P_{mat} = \left(P_{final} - P_{inic} - W_{inic}\right) * \frac{Bx_3}{Bx_2}$$
$$P_{mat} = \left(52562,5 - 18603,5 - 640,83\right) * \frac{95,80}{66,20}$$
$$P_{mat} = 48215,72kg$$

e- Agua a evaporar en el material alimentado

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_2}{Bx_3}\right)$$
$$W_{mat} = 48215,72\left(1 - \frac{66,20}{95,80}\right)$$
$$W_{mat} = 14897,55kg$$

f- Consumo de vapor en el tacho 4

$$G_{tacho6} = \frac{W_{inic} + W_{mat}}{T_0} * \varphi$$
$$G_{tacho6} = \frac{640,83 + 14897,55}{5} * 1,3$$
$$G_{tacho6} = 4039.98\frac{kg}{h}$$

Consumo de vapor total de los Tachos

$$G_{total\,tachos} = G_{tacho_1} + G_{tacho\,2} + G_{tacho\,3} + G_{tacho\,4} + G_{tacho\,5} + G_{tacho\,6}$$

$$G_{total\,tachos} = 3945{,}87 + 4396{,}49 + 9254{,}56 + 2362{,}21 + 6191 + 2019{,}98$$

$$G_{total\,tachos} = 28170{,}15\ \frac{kg}{h} = 28{,}17\ \frac{tvapor}{h}$$

Consumo de vapor de los Turbogeneradores

Tabla 2.13 Datos del Turbogenerador # 1

N (producida) kw-h	3900	λe kcal/kg	745,4
N (méc)	0,94	Pvs (Mpa)	0,12
N (eléct)	0,95	Tvs (ºC)	140
N (tubo)	0,94	λs kcal/kg	654,39
Pve (Mpa)	1,72	λ (ciclo adiabático ideal) kcal/kg	615
Tve (ºC)	340		

Determinando la Eficiencia Termodinámica.

$$N_t = \frac{i_0 - i_{2'}}{i_0 - i_2}$$

$$N_t = \frac{745{,}4 - 654{,}39}{745{,}4 - 615}$$

$$N_t = 0{,}697$$

$$N_t = 69.7\,\%$$

Cálculo de H_o (Diferencia de entalpía entre el vapor que entra a la turbina y el vapor después de la expansión ideal)

$H_o = \lambda e - \lambda_{ciclo\ adiabático\ ideal}$

$H_o = 745{,}4 - 615$

$H_o = 130{,}4$

Consumo de vapor Turbogenerador 1

$$G_{turbo\ 1} = \frac{N * 860}{N_t * H_0 * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo}}$$

$$G_{turbo\ 1} = \frac{3900 * 860}{0{,}697 * 130{,}4 * 0{,}94 * 0{,}95 * 0{,}94}$$

$$G_{turbo\ 1} = 43903{,}04\ \frac{kg}{h}$$

Calculo del consumo de vapor del Turbo 2

Tabla 2.14 Datos del Turbogenerador # 2

N (producida) kw-h	2350	λe kcal/kg	745,4
N (méc)	0,94	Pvs (Mpa)	0,12
N (eléct)	0,94	Tvs (ºC)	140
N (tubo)	0,94	λs kcal/kg	654,39
Pve (Mpa)	1,72	λ (ciclo adiabático ideal) kcal/kg	615
Tve (ºC)	340		

Consumo de Vapor del turbo # 2

$$G_{turbo\ 2} = \frac{N * 860}{N_t * H_0 * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo}}$$

$$G_{turbo\ 2} = \frac{2350 * 860}{0{,}697 * 130{,}4 * 0{,}94 * 0{,}94 * 0{,}94}$$

$$G_{turbo\ 2} = 26735{,}82\ \frac{kg}{h}$$

Consumo total de Vapor de los turbogeneradores

$$G_{turbos} = G_{turbo\ 1} + G_{turbo\ 2}$$

$$G_{turbos} = 43903{,}04\ \frac{kg}{h} + 26735{,}82\ \frac{kg}{h}$$

$$G_{turbos} = 70638{,}87\ \frac{kg}{h}$$

$$G_{turbos} = G_{MP}$$

Cálculo del consumo de vapor por la válvula reductora

$$G_{VR} = G_{NT} - G_{Turbos}$$
$$G_{VR} = 81330{,}18 - 70638{,}87$$
$$G_{VR} = 10691{,}31 \frac{kg}{h}$$

$$\%G_{VR} = \frac{G_{VR}}{Gcal} * 100$$
$$\%G_{VR} = \frac{10691{,}31}{95990{,}58} * 100$$
$$\%G_{VR} = 11{,}38$$

Cálculo del vapor generado en la caldera

$$Gcal = \frac{(G_{turbos} + G_{VR}) * 1{,}1}{0{,}932}$$
$$Gcal = \frac{(70638{,}87 + 10691{,}31) * 1{,}1}{0{,}932}$$
$$Gcal = 95990{,}55 \frac{Kg}{h}$$

Balances en la Caldera

Tabla 2.14 Datos de la Calderas

G (trabajo) kg/h	110000	λv (sobrec) kcal/kg	749,6
Coeficiente de pérdidas	1,1	T (H2O alimentada) ºC	115
T (gases) ºC	230	λ (agua sat) kca/kg	115,24
m (relación de aire empleado)	1,5	Coeficiente de pérdidas (α)	0,99
P (caldera) Mpa	1,93	Coeficiente de pérdidas (β)	0,93
Tv (caldera) ºC	350	Coeficiente de pérdidas (γ)	0,93

Cálculo del Valor Calórico Neto (VCN)

$$VCN = 4250 - 4850 * W$$
$$VCN = 4250 - 4850 * (0{,}498)$$
$$VCN = 1834{,}7 \frac{Kcal}{Kg}$$

Pérdidas de calor sensible en los gases (Qp)

$$Qp = T_{gases}(1 - W)\left(1{,}4 * m + \frac{0{,}5}{1 - W} - 0{,}12\right)$$
$$Qp = 230(1 - 0{,}498)\left(1{,}4 * 1{,}5 + \frac{0{,}5}{1 - 0{,}498} - 0{,}12\right)$$
$$Qp = 343.61 \frac{Kcal}{kg..bag}$$

Calor recuperado en el vapor (Qrecup)

$$Qrecup. = (VCN - Qp) * \alpha * \beta * \gamma$$
$$Qrecup. = (1834,7 - 343,61) * 0,99 * 0,93 * 0,93$$
$$Qrecup. = 1276,74 \frac{Kcal}{kg..bag}$$

Calor necesario para la vaporización de un Kg de agua (Qn)

$$Q_{nec} = i_0 - i_a$$
$$Q_{nec} = 749 - 115,2$$
$$Q_{nec} = 633,76 \frac{Kcal}{kg_vapor}$$

Índice de generación (IG)

$$IG = \frac{Qrecup.}{Qn} = \frac{1276,74}{633,76} = 2,014 \frac{kg_{vapor}}{kg_{bagazo}}$$

Cálculo de Valor Calórico Superior

$$VCS = 4600 * (1 - W)$$
$$VCS = 4600 * (1 - 0,498)$$
$$VCS = 2309,2 \frac{Kcal}{Kg}$$

Eficiencia total de la caldera (Ncald.)

$$Ncald. = \frac{Qrecup.}{VCS} * 100 = \frac{1276,74}{2309,2} * 100 = 55,28\%$$

Vapor producido según la molida (Vpsm)

$$Vpsm = IG * Kg\ de\ bagazo\ producido$$
$$Vpsm = 2,014 * 55200$$
$$Vpsm = 111203,63 \frac{Kg\ vapor}{h}$$
$$Vpsm = 111,20 \frac{t}{h}$$

Bagazo quemado (Bq)

$$Bq = \frac{G_{cald}}{IG} = \frac{95990,55}{2,014} = 47648,43 \ \frac{Kg.bag}{h}$$

$$Bq = 47,64 \frac{t.bag}{h}$$

Bagazo Sobrante (Bs)

$$Bs = Bagazo....Pr\ oducido - Bagazo...quemado$$

$$Bs = 55200 - 47648,43$$

$$Bs = 7551,56 \frac{kg.bag}{h} = 7,5 \frac{t}{h}$$

$$Bs = 180 \frac{t.baga}{d}$$

Eficiencia en la caldera

$$Eficiencia = \frac{G_{cald.}(i_0 - i_2)}{Bq * VCN} * 100 = \frac{95990,55 * (749,6 - 115,24)}{47648,43 * 1834,7} * 100 = 69,6\%$$

Electricidad Generada

$$Electricidad\ Generada = \frac{G_{Turbos}}{Ind.de.consumoTécnico}$$

$$Electricidad\ Generada = \frac{70638,87}{11,3} \frac{kg\ vapor/h}{Kg\ vapor/kw - h}$$

$$Electricidad\ Generada = 6251,22Kw$$

Electricidad Consumida

$$Electricidad\ Consumida = CañaMolida * Ind.GeneraciónElectrica$$

$$Electricidad\ Consumida = 153,33 \frac{tcaña}{h} * 32 \frac{Kw}{tcaña}$$

$$Electricidad\ Consumida = 4906,66Kw/h$$

Electricidad Entregada al SEN

$$Electricidad\ Entregada = ElectricidadGenerada - ElectricidadConsumida$$

$$Electricidad\ Entregada = 6251,22 - 4906,66$$

$$Electricidad\ Entregada = 1344,56kW/h$$

Tabla 2.15 Resumen de los balances de masa y energía según condiciones operacionales actuales.

Balance de Masa			
Caña molida (t/h)	153,33	Masa Jugo Mezclado (t/h)	176,33
Bagazo % Caña	36	Masa Jugo Alcalizado (t/h)	178,52
Masa de bagazo (t/h)	55,20	Masa Jugo entrada Clarificador (t/h)	178,52
% extracción en los molinos	100	Masa de Lodo (t/h)	29,13
Masa de jugo en molinos (t/h)	153,33	Masa de Jugo Claro (t/h)	149,39
Agua de Imbibición (t/h)	55,2	Masa de Cal (t/h)	76,6
Masa Jugo en los filtros (t/h)	23	Masa de Lechada (t/h)	2,19
Balance de energía			
Consumo de vapor Pre-evaporadores (t/h)	71,18	Vapor generado en la Caldera t/h	95,99
Consumo de vapor 1er Evaporador (t/h)	12,06	IG (índice de generación) kgv/kg bag	2,014
Consumo de vapor de tachos (t/h)	28,17	ηcal (Eficiencia total de las calderas) %	55,28
Consumo de vapor Calentador 1 J.C (t/h)	3,57	Bq (bagazo quemado) t/h	47,64
Consumo de agua Calentador 2 L-L (t/h)	88,15	Condensados (t/h)	83,24
Consumo de vapor Calentador 3	9,08	Agua de reposición (t/h)	12,74
Consumo de vapor Calentador 4	6,56	% Reposición	13,2
Consumo de vapor turbogeneradores (t/h)	70,63	Electricidad Generada kW-h/h	6251,22
Consumo de vapor Necesidades. Tecnológicas (t/h)	81,33	Electricidad Consumida kW-h/h	4906,66
Consumo de vapor Válvula Reductora t/h	10,69	Electricidad Entregada al SEN kW-h/h	1344,56
% Válvula Reductora	11,13	Electricidad Entregada al SEN kW-h/d	32269,4

2.4. Análisis de los Resultados:

En las condiciones actuales se muelen 153 t/h de caña, necesitándose 55,2 t/h de agua de imbibición para lograr un 100 % de extracción de jugos en los molinos, obteniéndose así 153 t/h de jugo en los molinos y 55,2 t/h de bagazo, este último es el principal combustible utilizado en la generación de vapor.

Las calderas existentes generan alrededor de 96 t/h de vapor, con un índice de generación de 2,014 kg vapor/ Kg bagazo y una eficiencia del 55,28 % valor adecuado según **(Hugot, 1974).** El bagazo que se produce es utilizado como combustible en la caldera quemándose a razón de 47,64 t/h dejando una cantidad sobrante de 7,5 t/h de bagazo.

Del vapor generado son consumidas 10,69 t/h por la válvula reductora lo que representa un 11,13 % por válvula reductora valor próximo al rango optimo de 12-15 % según **(Espinosa, 1990).** Los condensados recuperados para su posterior utilización en la caldera son de 83,24 t/h necesitándose 12,74 t/h de agua de reposición lo cual representa un 13,2 % de agua de reposición valor que se encuentra en el rango propuesto por la literatura 10-15 % **(Espinosa, 1990)**.

Los turbogeneradores consumen 70,63 t/h de vapor y generan 6251,22 kW-h/h de energía eléctrica, consumiéndose por el central 4906,66 kW-h/h lo que representa el 78,4 %, los otros 1344,56 kW-h/h equivalentes al 21,6 % son entregados al Sistema Electroenergético Nacional. Los valores relativamente pequeños de entrega de energía eléctrica al SEN se deben a que los turbos existentes no son de alta potencia (6500 kW entre los dos), además estos son turbos obsoletos que operan a contrapresión.

2.4.1. Análisis de la variante 1. Balances de masa y energía.

Durante el desarrollo de esta variante se considera una inversión en las áreas de generación de vapor y de generación eléctrica con el objetivo de cambiar el turbogenerador de contrapresión existente en la actualidad por un turbo de extracción –condensación de 15 MW, así como la caldera por otra de alta presión (3,92 MPa).

Los balances y cálculos se realizaron según la metodología indicada para el análisis de las condiciones actuales y fueron programados en un software en Excel siguiendo la metodología de (**Espinosa, 1990).**

Tabla 2.16. Resumen de los balances de masa y energía de la Variante 1

Balance de Masa			
Caña molida (t/h)	153,33	Masa Jugo Mezclado (t/h)	176,33
Bagazo % Caña	36	Masa de Lechada de cal (t/h)	2,19
Masa de bagazo (t/h)	55,20	Masa Jugo Alcalizado (t/h)	178,52
% extracción en los molinos	100	Masa Jugo entrada Clarificador (t/h)	178,52
Masa de jugo en molinos (t/h)	153,33	Masa de Lodo (t/h)	29,13
Agua de Imbibición (t/h)	55,2	Masa de Jugo Claro (t/h)	149,39
Masa Jugo en los filtros (t/h)	23	Masa de Cal (t/h)	76,6
Balance de energía			
Consumo de vapor Pre-evaporadores (t/h)	71,18	Consumo de vapor Necesidades. Tecnológicas (t/h)	81,33
Consumo de vapor 1er Evaporador (t/h)	12,06	Vapor generado en la Caldera t/h	105
Consumo de vapor de tachos (t/h)	28,17	IG (índice de generación) kgv/kg bag	1,88
Consumo de vapor Calentador 1 J.C (t/h)	3,57	η_{cal} (Eficiencia total de las calderas) %	57,98
Consumo de vapor Calentador 2 L-L (t/h)	98,02	Bq (bagazo quemado) t/h	53,33
Consumo de vapor Calentador 3	9,08	Condensados Proceso para caldera t/h	106912,08
Consumo de vapor Calentador 4	6,56	Electricidad Generada kW-h/h	15000
Consumo de vapor turbo Extracc-Condensac (t/h)	105	Electricidad Consumida kW-h/h	5306,66
Vapor para condensación (t/h)	23,66	Electricidad Entregada kW-h/h	9693,33

En este análisis se trataran básicamente los aspectos que difieren de la línea base del central analizada anteriormente. Las calderas nuevas de alta presión (que se proponen para esta variante), generan 105 t/h de vapor, con un índice de generación de 1,96 kg vapor/ Kg bagazo y una eficiencia del 57,98 %, valores adecuados según la literatura **(Hugot, 1974).** Todo este vapor enviado a proceso es consumido por el turbogenerador de extracción –condensación, el

mismo entrega al proceso 81,33 t/h de vapor que cubren las necesidades tecnológicas, el resto 23,66 t/h se condensa para su recirculación a la caldera.

El bagazo que se produce es utilizado como combustible en la caldera quemándose a razón de 53,33 t/h dejando una cantidad sobrante de 1,86 t/h de bagazo. Como se aprecia la masa de condensado aumenta significativamente lo que favorece el balance de agua en el ingenio, esto permite la utilización de agua de mayor calidad en la generación de vapor y en otros consumos propios de la tecnología de fabricación de azúcar, al mismo tiempo representa un significativo aporte en la práctica de producciones más limpias y en el respeto a los recursos naturales y el ecosistema. El turbogenerador genera 15 000 kW-h, de estos son consumidos por el ingenio 5306,66 kW-h/h lo cual representa un 35,3% del total de la energía eléctrica generada; el otro 64,7% es entregado al Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Electricidad Generada durante el período de zafra 129 días

Electricidad Generada = 15 000 kW *24 h/d *129 d

Electricidad Generada = 46 440 000 kW -h

Electricidad Consumida durante el período de zafra 129 días

Electricidad Consumida = 5306,66 kW -h/h*24 h/d *129 d

Electricidad Consumida = 16 429 419,36 kW -h

Electricidad Entregada al SEN durante el período de zafra 129 días

Electricidad Entregada = Electricidad Generada - Electricidad Consumida

Electricidad Entregada = 46 440 000 kW-h - 16 429 419,36 kW-h

Electricidad Entregada= 30 010 580,64 kW-h

Generación con el bagazo sobrante de la zafra

Después del período de zafra se generará con el bagazo que se logró almacenar, que fueron unas 5774,04 t de bagazo, de esta masa de bagazo se destinaran con tal fin 5500 t de bagazo el otro restante será para la arrancada de la zafra siguiente.

Días que se generara con el bagazo sobrante de la zafra

$$\frac{\text{Bag.Sobrant}}{\text{Bag.Quem}} = \frac{5500}{1280{,}02}\frac{\text{t}}{\text{t/d}} = 4{,}29 \text{ dias}$$

Electricidad Generada durante los 4,29 días

Electricidad Generada =15 000 Kw *24 h/d *4,29 d

Electricidad Generada =1 544 400 kW-h

Electricidad Consumida fuera de zafra

Después de concluida la zafra, la electricidad consumida vendrá dada por el sistema de operación de la caldera y por el turbo de extracción–condensación, este consumo oscila en un rango de un 8- 12 % de la capacidad nominal del turbo **(Vilches, 2013)**, aproximadamente 875 kW-h/h.

El consumo del turbo de extracción –condensación será por las bombas de alimentación del agua de enfriamiento para la sección de condensación y la bomba del agua condensada hacia caldera, sumando un total de 400 kW-h

Electricidad Consumida Total = Consumo Caldera + Consumo por el Turbo

Electricidad Consumida Total = 875 kW-h + 400 kW-h

Electricidad Consumida Total = 1275 kW-h

Electricidad Consumida durante los 4,29 días

Electricidad Consumida = 1275 kW-h/h * 24 h/d * 4,29 d

Electricidad Consumida = 131 274 kW-h

Electricidad Entregada al SEN durante los 4,29 días

Electricidad Entregada = Electricidad Generada - Electricidad Consumida

Electricidad Entregada = 1 544 400 kW-h – 131 274 kW-h

Electricidad Entregada = 1 413 126 kW-h

Generación con el bagazo sobrante del central Caracas

Después que se agote el bagazo sobrante de la zafra se continuara la generación con una cantidad de bagazo disponible del bagazo sobrante en el central Caracas pues este posee una mayor capacidad de molienda obteniéndose una mayor cantidad de bagazo sobrante que no tiene un uso útil, según los cálculos realizados por los técnicos de este central, se pudiera comprar a este central 60 000 t de bagazo.

Días que se generara con el bagazo sobrante del central Caracas

$$\frac{\text{Bag.Sobran}}{\text{Bag.Quem}} = \frac{60000}{1280{,}02}\frac{\text{t}}{\text{t/d}} = 46{,}87 \text{ días}$$

Electricidad Generada durante los 46,87 días

Electricidad Generada =15 000 kW *24 h/d * 46,87 d

Electricidad Generada =16 873 200 kW-h

Electricidad Consumida durante los 46,87 días

Electricidad Consumida = 1275 kW-h/h * 24 h/d * 46,87 d

Electricidad Consumida = 1 434 222 kW-h

Electricidad Entregada al SEN durante los 46,87 días

Electricidad Entregada = Electricidad Generada - Electricidad Consumida

Electricidad Entregada = 16 873 200 kW-h – 1 434 222 kW -h

Electricidad Entregada = 15 438 978 kW -h

Generación con los RAC recuperados en los centros de limpieza

Generando con los RAC

Se usarán los residuos agrícolas cañeros (RAC) disponible en los Centros de Limpieza, pues estos son fáciles de trasladar al ingenio. En los centros de limpieza se procesan el 50 % de la caña que se muele diaria, en estos se separa un 8 % de materias extrañas (referidos a caña procesada).

Para conocer el valor calórico neto de los RAC se consultaron diferentes autores, según **(Espinosa, 1990)** la paja de caña posee un alto valor calórico: 3809 kcal/kg con 10 % de humedad, según **(Pérez de Alejo et al; 2006)** se puede asumir que el Valor Calórico es como mínimo alrededor de 2750 Kcal/kg aunque puede variar apreciablemente en dependencia del por ciento de humedad, momento de la recogida y los rendimientos agrícolas de la caña, **(Rubio, 1994)** propone una correlación que puede ser utilizada:

VCS = 15582 – 192,5 * H (kJ/kg)

Donde H es la humedad del RAC y debe estar entre 20 y 46 %.

Al utilizar la correlación anterior, considerando un 20 % de humedad, el valor calórico neto es de 3726,8 kcal/kg, este valor fue el utilizado en los cálculos.

Caña Molida: 3680 t/d

Caña procesada: 50 % caña molida:

3680 t/d * 0,5 = 1840 t/d

Materias Extrañas Separadas: 8% de la caña procesada

1840 t/d * 0,08= 147,2 t/d

Días de zafra: 129 d

Materias Extrañas Separadas en la zafra (129 d):

147,2 t/d * 129 d = 18 988,8 t

Días que se Genera con RAC: según el balance realizado en la caldera se queman en esta 592,7 t/h de RAC.

$$\frac{\text{Total de RAC (t)}}{\text{RAC quemandos (t/h)}} = \frac{18988{,}8\ \text{t}}{592{,}75\ \text{t/d}} = 32{,}03\ \text{días}$$

Electricidad Generada durante los 32,03 días

Electricidad Generada =15 000 kW * 24 h/d * 32,03 d

Electricidad Generada = 11 530 800 kW -h

Electricidad Consumida durante los 32,03 días

Electricidad Consumida = 1275 kW -h/h * 24 h/d * 32,03 d

Electricidad Consumida = 980 118 kW-h

Electricidad Entregada al SEN durante los 32,03 días

Electricidad Entregada = Electricidad Generada - Electricidad Consumida

Electricidad Entregada = 11 530 800 kW -h – 980 118 kW -h

Electricidad Entregada = 10 550 682 kW -h

Tabla 2.17. Resumen de la primera variante.

Origen de la biomasa utilizada	No de Días	Electricidad Generada (kW-h)	Electricidad Consumida (kW-h)	Electricidad Entregada (kW-h)
Durante la zafra	129,00	46 440 000,00	16 429 419.36	30 010 580.64
Bagazo Sobrante durante la zafra	4,29	1 544 400,00	131 274,00	1 413 126,00
Bagazo Sobrante central Caracas	46,87	16 873 200,00	1 434 222,00	15 438 978,00
RAC	32,03	11 530 800,00	980 118,00	10 550 682,00
Total	212,19	76 388 400,00	18 975 033,36	57 413 366,64

Como se aprecia anteriormente durante la primera alternativa se generará electricidad durante 212,19 días en total, comenzando con la quema del bagazo obtenido en el proceso normal de molienda del central, terminado el período de zafra se continúa la operación de generación de vapor (y electricidad) con el bagazo sobrante y con el traído del central Caracas, finalmente se utilizan los residuos agrícolas cañeros (RAC) como combustible. Se observa que la mayor entrega de electricidad es durante el período de zafra lo cual representa el 52 % de la electricidad total generada, esto se debe a que el período de zafra es el más extenso pues se genera electricidad durante 129 días, también se aprecia que el período que se genera con el bagazo sobrante de la zafra solo dura 4,29 días que serían 4 días y aproximadamente 7 h horas de generación, entregando el 2,4% de la electricidad entregada total.

Con el bagazo traído del central Caracas se genera durante 46,87 días para un 26 % del total generado y con RAC se genera 32,03 días para un 18,3 % de la electricidad generada. Del total de electricidad generada durante esta variante se entrega SEN el 75,15 %.

2.4.2. Análisis de la variante 2. Balances de masa y energía.

La variante 2 solo se diferencia de la variante 1 en que en su concepción se concibe que aparte de las biomasas utilizadas en esta variante se adiciona otra fuente: el marabú.

En el municipio de Aguada de Pasajeros, provincia Cienfuegos existen 9354,81 ha de tierras ociosas de las cuales el 83 % esta cubierto de marabú, (Naranjo, 2012), según este autor por cada hectárea de marabú se estima alrededor de 37 toneladas de biomasa. A continuación se resumen las potencialidades de biomasa por concepto de marabú en el municipio Aguada.

Superficie cubierta de tierras ociosas: 9 354,81 ha

Superficie cubierta por marabú: 83 % tierras ociosas

9 354,81 ha *0,83= 7 764,49 ha cubiertas por marabú

De las hectáreas cubiertas por marabú se podrá disponer de forma inmediata, del 62 % de estas, ya que el otro porciento se encuentra en zonas de difícil acceso, ya sea por ser zonas pantanosas, de ciénagas o por la no existencia de caminos para acceder a estas zonas.

Marabú al que se puede acceder:

7 764,49 ha *0,62 = 4813,98 ha

De este total de marabú, al que existe acceso, solo se considera en esta variante el requerido para garantizar que el sistema trabaje durante 335 días al año, de esta forma se garantiza aproximadamente un mes para las labores de mantenimiento planificado del equipamiento.

Las biomasas obtenidas directamente del procesos agroindustrial azucarero garantizan una operación de sistema de 212,19 días en total (aquí se consideran la operación en zafra, la operación una vez terminada la zafra operando con bagazo sobrante y traído del Central Caracas y los RAC obtenidos en el centro de limpieza). Por tanto para garantizar los 335 día al año planificado se requiere operar con la biomasa proveniente del marabú durante 122,81 días.

Estimado de biomasa: 37 t/ha

4 813,98 ha *37 t/ha = 178 117,26 t de biomasa total

De este total de biomasa solo usaremos las necesarias para generar durante los 122,81 días con el marabú

Marabú quemado por día) 883.86 t/d * (días que se generará) 122,81 d =108 546, 84 t de biomasa para generar con el marabú.

Electricidad Generada durante los 122,81 días

Electricidad Generada =15 000 Kw *24 h/d * 122,81 d

Electricidad Generada = 44 211 600 kW-h

Electricidad Consumida durante los 122 días

Electricidad Consumida = 1275 kW-h/h * 24 h/d * 122,81 d

Electricidad Consumida = 3 757 986 kW-h

Electricidad Entregada al SEN durante los 122 días

Electricidad Entregada = Electricidad Generada - Electricidad Consumida

Electricidad Entregada = 44 211 600 kW-h - 3 733 200 kW-h

Electricidad Entregada = 40 453 614 kW-h

Tabla 2.18. Resumen de la segunda variante.

Origen de la biomasa utilizada	No de Días	Electricidad Generada (kW-h)	Electricidad Consumida (kW-h)	Electricidad Entregada (kW-h)
Durante la zafra	129,00	46 440 000,00	16 429 419,36	30 010 580,64
Bagazo Sobrante durante la zafra	4,29	1 544 400,00	131 274,00	1 413 126,00
Bagazo Sobrante central Caracas	46,87	16 873 200,00	1 434 222,00	15 438 978,00
RAC	32,03	11 530 800,00	980 118,00	10 550 682,00
Marabú	122,81	44 211 600,00	3 757 986,00	40 453 614,00
Total	**335,00**	**120 600 000,00**	**22 733 019,36**	**97 866 980,64**

La diferencia entre la variante uno y dos es que después que se termine de usar el bagazo y los RAC como combustible se generará durante otro período de tiempo utilizando como combustible el marabú disponible de la zona. Durante la variante dos se logra generar durante otros 122,81 días generando durante los mismos 44 211 600,00 (kW-h) y entregando al SEN 40 453 614,00 (kW-h) lo cual representa del total entregado el 41,3 %

2.5. Conclusiones parciales del capítulo 2.

1. Las calderas existentes en el central Antonio Sánchez operan en la actualidad a bajas presiones, no obstante, generan con un índice de 2,014 kg vapor/ kg bagazo y una eficiencia del 55,28 %, valor adecuado para este tipo de calderas según la bibliografía consultada.
2. En el central se está aprovechando el vapor de escape ya que el consumo de vapor por válvula reductora es de un 11,13 %, valor que se encuentra entre los rangos establecidos propuestos por los autores estudiados.
3. Actualmente se generan 6251,22 kW-h/h de energía eléctrica, consumiéndose por el central 4906,66 kW-h/h lo que representa el 78,4 %, los otros 1344,56 kW-h/h equivalentes al 21,6 % son entregados al SEN.
4. Con la propuesta del turbo de extracción- condensación no se requiere pasar vapor por la válvula reductora, además, se aprovecha un condensado limpio (23,66 t/h) que es enviado directamente para ser utilizado en las calderas.
5. Con el montaje del turbo de extracción- condensación se generarán durante la zafra 15 000 kW-h/h, de estos podrían ser entregados al SEN 9693,33 kW-h/h lo cual representa el 64,7 % de la electricidad total generada.
6. Durante el período de generación que comprende la variante 1 se generaron en total 76 388 400,00 kW-h/h, de estos se entregaron al SEN 57 413 366,64 kW-h/h lo cual representa el 75,15 % de la electricidad total generada.
7. Usando el marabú como combustible aproximadamente durante 123 días se entregan 40 453 614,00 kW-h al SEN.
8. En la variante 2 se logra generar 120 600 000 kW-h, de estos se entregan al SEN 97 866 980,64 kW-h/h equivalentes al 81 % de la total generada.

3. Capítulo 3. Análisis económico.

3.1 Introducción

Durante el desarrollo de este capítulo se realizará una evaluación económica de las variantes desarrolladas en el capítulo anterior. Para realizar la estimación de los costos de las diferentes variantes de este análisis se siguió la metodología que aparece en el **(Peters, 2003),** la cual se ha programado en una hoja en Excel para facilitar los cálculos.

3.2 Determinación del costo total de inversión para ambas alternativas.

En el caso estudiado ambas variantes presentan la misma instalación de equipos, lo que significa el mismo valor del costo de la inversión.

Para la estimación del costo de la inversión se tienen en cuenta las modificaciones implementadas en el proceso, siendo para las dos variantes el turbogenerador de extracción-condensación y la caldera de alta presión.

Tabla 3.1: Precio de equipamiento

Equipos	**Costo ($)**
Turbo Extracción- Condensación	8 875 000 [1]
Caldera de Alta Presión	2 000 000 [2]
Total	**10 875 000**

1- (Vilches, 2013)
2- www.matche.com

Tabla 3.2: Determinación del costo total de la inversión		Costo ($)
Costo de equipamiento*		**10 875 000**
Costos directos		
	Fracción de (*)	
Instalación del equipamiento	0,35	3 806 250,00
Instrumentación y control	0,30	3 262 500,00
Instalación de tuberías	0,16	1 740 000,00
Instalaciones eléctricas	0,10	1 087 500,00
Construcción	0,10	1 087 500,00
Facilidades de servicio	0,10	1 087 500,00
Costo total directo		**22 946 250,00**
Costos indirectos		
Ingeniería y supervisión	0,32	3 480 000,00
Contingencia	0,10	1 087 500,00
Costo total indirecto		**4 567 500,00**
Costo fijo de la inversión		**27 513 750,00**
Inversión de trabajo	0,45	4 893 750,00
Costo total de la inversión		**32 407 500,00**

3.3 Determinación del costo total de producción para las variantes evaluadas.

Considerando que se cuenta con la base de transporte del central Antonio Sánchez, con todo la infraestructura requerida, se tomará de forma preliminar como precio del bagazo 8.0 $/t **(Alomá, 2011),** más el valor del combustible consumido en el transporte.

Km recorridos: 90 Km (recorrido completo)

Capacidad de un camión + arrastre: 10 t de bagazo

Índice de consumo del camión KAMAZ: 2 Km/L

Precio del combustible: 0,8134 $ / L **(CUPET 5-11-2012)**

Combustible consumido x recorrido= 90 Km / 2 Km/L = 45 L de combustible

Costo combustible x recorrido = Combustible consumido x recorrido * Precio del combustible

Costo combustible x recorrido = 45 L * 0,8134 $ / L

Costo combustible x recorrido = **36,60 $/recorrido**

Costos de transportación del bagazo traído del central Caracas (por concepto de combustible utilizado)

Precio t de bagazo= Costo combustible x recorrido / toneladas de bagazo x por recorrido

Precio t de bagazo= 36,60 $/recorrido / 10 t de bagazo x recorrido

Precio t de bagazo= 3,66 $/ t de bagazo

Costo total del bagazo del central Caracas

Costo Total = Costo actual del bagazo + Costos de transportación

Costo Total = 8,0 $/t +3,66 $/t

Costo Total = 11,66 $/t

3.4. Análisis económico Variante 1

Tabla 3.3: Costo de materias primas Variante 1

Materias Primas	**Precio $/t**	**Consumo Anual t/año**	**Costo anual materiales $/año**
Bagazo consumido central A Sánchez	8,00	230 609,00	1 844 877,44
Bagazo consumido central Caracas	11.66	60 000,00	699 600,00
RAC	2,00*	18 988,80	37 977,60
Costo anual total por materias primas			**2 582 455,04**

* Costos estimados según departamento económico Central A. Sánchez.

Tabla 3.4: Determinación del costo total de producción Variante 1.

Componentes	**Factor por defecto* base**	Costo ($/año)
Materias primas	-	2 582 455,04
Mano de obra	-	69 480,00
Operación y supervisión	0,1*Mano de obra	6 948,00
Mantenimiento y reparaciones	-	70 000,00
Suministro a operaciones	0,1*Mantenimiento y reparaciones	7000,00
Gastos de laboratorio	0,05* Mano de obra	3 474,00
Costos Variables		**2 739 357,04**
Impuestos	0,01*CFI	91 712,50
Seguros	0,004*CFI	36 685,00
Cargos fijos		**128 397,50**
Costos de producción		**2 867 754,54**
Administración	0,15* labor y supervisión	14 642,80
Gastos generales		**14 624,80**
Costo total de producción		**2 882 396,34**

Para el cálculo de los indicadores dinámicos se decide realizar un análisis de sensibilidad variando el precio de venta de electricidad puesto que con el precio de venta actual (0,10 $/kW-h), se obtienen valores no factibles, lo que hace que la inversión no sea rentable, al variarlo se alcanzan valores factibles económicamente como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Indicadores de rentabilidad para la variante I.

Variante I. Casos de estudio	**Precios electricidad ($/kW-h)**	**Costo de inversión total ($)**	**Costos de producción ($/año)**	**Valor actual neto VAN ($)**	**TIR (%)**	**PRD (años)**
I(A1)	0,10	32407500,00	2882397,34	-15 409 649,08	2	---
I(A2)	0,12			-8 730 224,90	11	---
I(A3)	0,15			1 288 911,38	13	15
I(A4)	0,20			17 987 471,84	21	7

Obsérvese que en estas condiciones la inversión no resulta atractiva para las variantes I(A1) y I(A2) con precios de electricidad de 0,10 y 0,12 $/kW-h no se amortiguarán ni en los 15 años, solo duplicando los precios actuales de la energía eléctrica su período de recuperación es aproximadamente 7 años (I(A4). En los anexos del 4 al 7 se encuentran las gráficas del perfil del VAN para los casos de estudios de esta variante.

3.5. Análisis económico Variante 2

Para la evaluación económica de esta variante se calcularon los costos de materias primas debido a que durante esta variante se incrementan los costos por la utilización del marabú como combustible, así como los costos totales de producción, después se determinaron los principales indicadores de rentabilidad para el proceso.

Tabla 3.7: Costo de materias primas Variante 2

Materias Primas	**Precio $/t**	**Consumo Anual t/año**	**Costo anual materiales $/año**
Bagazo consumido propio central	8,00	230 609,00	1 844 877,44
Bagazo consumido central Caracas	11.66	60 000,00	699 600,00
RAC	2,00	18 988,80	37 977,60
Marabú	25*	108 546,84	2 713 671,00
Costo anual total por materias primas			**5 296 126,04**

*Precios de referencia tomados de www.quiminet.com

Tabla 3.8: Determinación del costo total de producción Variante 2

Componentes	**Factor por defecto* base**	**Costo ($/año)**
Materias primas	-	7 467 062,84
Mano de obra	-	69 480,00
Operación y supervisión	0,1*Mano de obra	6 948,00
Mantenimiento y reparaciones	-	70 000,00
Suministro a operaciones	0,1*Mantenimiento y reparaciones	7000,00
Gastos de laboratorio	0,05* Mano de obra	3 474,00
Costos Variables		5 453 028,04
Impuestos	0,01*CFI	91 712,50
Seguros	0,004*CFI	36 685,00
Cargos fijos		**128 397,50**
Costos de producción		**5 581 425,54**
Administración	0,15* labor y supervisión	14 642,80
Gastos generales		**14 642,80**
Costo total de producción		**5 596 068,34**

Tabla 3.9: Indicadores de rentabilidad para la Variante II

Variante II. Casos de estudio	Precios electricidad ($/kW-h)	Costo de inversión total ($)	Costos de producción ($/año)	Valor actual neto VAN ($)	TIR (%)	PRD (años)
II(A1)	0,10	32 407 500,00	5 596 068,34	5 560 444,12	15	10,8
II(A2)	0,12			19 590 949,62	22	6,5
II(A3)	0,15			40 636 707,88	31	4,2
II(A4)	0,20			75 712 971,63	45	2,8

Al efectuar el análisis de los indicadores de rentabilidad de la variante II se observa que para el primer caso de estudio II (A1), en el cual se tiene en cuenta el precio actual de la electricidad, sólo es posible recuperar la inversión en aproximadamente 11 años, lo que hace que esta inversión no sea muy atractiva; para los casos analizados del II(A2) al II(A4) vemos como al aumentar el precio de venta de la electricidad desde 0,12 a 0,20 $/kW-h se logra recuperar la inversión en un máximo de 6,5 años, ratificando que para realizar la inversión debe analizarse diferentes factores que influyen en la rentabilidad económica de las variantes propuestas. En los anexos del 8 al 11 se encuentran las gráficas del perfil del VAN para los casos de estudios de esta variante.

3.6. Conclusiones Parciales

1. El costo total de la inversión asciende a los $ 32 407 500,00 siendo este uno de los factores que incide en la rentabilidad de las variantes.
2. El bagazo del central Antonio Sánchez fue la mayor fuente de materia prima que se consumió durante la primera variante siendo esta de 230 609,00 t/año, fue la que más influyó en los costos por materias primas con un valor de 1 844 877,44 $/año el cual representa el 71 % del costo total.
3. Mediante un análisis de sensibilidad de la inversión en función del precio de venta de la energía eléctrica se comprobó que con precios de electricidad de 0,10 y 0,12 $/kW-h respectivamente no se logra recuperar el capital invertido; los otros análisis con precios de 0,15 y 0,20 $/kW-h comienzan a amortiguar la inversión a partir de los 15 y 7 años respectivamente lo cual determina que esta variante sea poco atractiva desde el punto de vista económico pues se prolonga demasiado el período de recuperación de la inversión.

4. Para los dos primeros casos de estudio de la variante II, con precios de electricidad de 0,10 y 0,12 $/kW-h se observa que todavía resulta demasiado extenso el período de recuperación de la inversión lográndose en aproximadamente 11 y 7 años respectivamente. Sin embargo, los otros casos de estudio con precios de 0,15 y 0,20 $/kW, se convierten en propuestas mucho más atractivas desde el punto de vista económico al recuperar la inversión en sólo 4 y 3 años respectivamente

Conclusiones Generales.

1. Para aumentar la eficiencia en las estaciones de generación de vapor y energía eléctrica en el central Antonio Sánchez se requiere la instalación de una caldera de alta presión y de un turbogenerador de extracción condensación.

2. Las fuentes de biomasa que garantizan una inversión atractiva en el central Antonio Sánchez están constituidas por el bagazo producido por el propio central, el bagazo traído del central Caracas, los RAC y la biomasa del marabú disponible en las cercanías del central.

3. De los balances de masa y energía se concluye que el central Antonio Sánchez presenta índices de generación de vapor y electricidad acorde a lo reportado por la literatura, no obstante se evidencia obsolescencia técnica dado por los altos índices de consumo de vapor del turbo existente.

4. La variante 1, con 212 días de operación al año no es recomendable para las condiciones del central Antonio Sánchez, su periodo de retorno resulta muy extenso.

5. La variante 2, con 335 días de operación al año resulta más atractiva desde el punto de vista técnico y económico al presentar indicadores de rentabilidad más favorables.

6. Los precios de venta actual de la energía eléctrica no están acorde con los elevados precios en el mercado mundial de los equipos requeridos para su producción, por lo que cada variante tiene que ser cuidadosamente analizada.

7. Al concluir el estudio resulta perceptible la incidencia marcada del precio de la electricidad en la factibilidad económica de ambas variantes, demostrándose que este constituye un factor determinante en la rentabilidad de las propuestas.

Recomendaciones

1. Se recomienda al Central Antonio Sánchez analizar las variantes tecnológicas propuestas para su posible implementación.
2. Analizar la factibilidad técnica, económica y ambiental del empleo de otras biomasas.
3. Efectuar un estudio de factibilidad en otros centrales del país que posean mejores condiciones para generar electricidad a partir de la biomasa.

Bibliografía.

1. ALMENARES, V. 2009. Impacto de la reconversión en la hidrolisis del bagazo para la reanimación de la producción de furfural como producto de alto valor agregado. Trabajo de diploma, Universidad Central De Las Villas.

2. ALOMÁ, I. 2011. Tecnología sostenible para la obtención de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar. Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central " Marta Abreu" De Las Villas

3. ASADI, M. 2007. Beet-Sugar Handbook. New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

4. BAIN, R. & BROER, K. 2011. Thermochemical Processing of Biomass. In: BROWN, R. C. (ed.). Iowa.

5. BALLESTEROS, I. 2006. Desarrollo Rural y Energías Renovables Biomasa y Biocombustibles.

6. CURBELO, A. 2008. Generación de electricidad a partir del bagazo en Cuba.

7. DIEZ, F. G., N. 2012. Bagazo de caña de azúcar: ¿energía o etanol carburante? Dos casos de estudio. Available: http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar31.

8. ESPINOSA, N. & PEÑALVER, Y. 2012. Balance Energético en la Empresa Azucarera Antonio Sánchez para reducir consumos y aumentar el sobrante de bagazo. In: PROCESOS, I. D. (ed.). Santa Clara.

9. ESPINOSA, R., CARRILLO, M. J., MACHADO, S. & REYMOND, A. 1984. Sistema de utilización del calor.

10. ESPINOSA, R. Y. C. 2001. Análisis de la integración energética en los procesos tecnológicos de la industria azucarera.

11. ESTUPIÑAN, J. 2013. Termodinámica Técnica. Ciclo Rankine. UCLV.

12. FERNÁNDEZ, J. 1995. La biomasa como fuente de energía y productos para la agricultura y la industria. In: CIEMAT, E. (ed.). Madrid.

13. FERNÁNDEZ, P. 2003. Turbinas de Vapor. Universidad de Cantabria.: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

14. FIGUEROA, F. 2008. "Tablero de comando" para la promoción de biocombustibles en Ecuador. CEPAL.

15. FOCER 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. San José, Costa Rica.

16. GARCÍA, C. 2007. Simulación de una planta de producción y purificación de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol usando el simulador comercial Hysys Plant 3.2. Trabajo de Diploma, Universidad Industrial de Santander.

17. GÓMEZ, A., KLOSE, W. & S, R. 2008. Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite.

18. GÓMEZ, O. 2009. Simulación del proceso tecnológico de obtención de etanol a partir del bagazo de caña utilizando el Software Hysys. Trabajo de Diploma, Universidad Central Marta Abreu De Las Villas.

19. HONIG, P. 1953. Principles of Sugar Technology.

20. HUGOT, E. 1980. Manual para Ingenieros Azucareros, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.

21. JENKINS, G. H. 1971. Introducción a la tecnología de la azúcar de caña, Edición Ciencia y Técnica. .

22. JORGE, H., VERA, A., CAMPOS, R., JORGE, I., ESTEVÉZ, Y. & GARCÍA, H. 2005. La biomasa cañera y el tránsito en Cuba hacia una energética sustentable.

23. KEENAN, J. 1988. Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid and Solid Phases.

24. KERN, D. Q. 1999. Procesos de Transferencia de Calor. México: Compañía Editorial Continental, S.A DE C.V México.

25. KNOTHE, G. G., J; KRAHL, J 2005. The Biodiesel Handbook. Illinois: AOCS PRESS.

26. LA SERNA, N. & AL, E. 1982. Productos Aglomerados a partir de Bagazo, La Habana, Editorial Ciencia y Técnica.

27. LEE, S., SPEIGHT, J. & LOYALKA, S. 2007. Handbook of Alternative Fuel. New York: Taylor & Francis Group, LLC.

28. LORENZINI, G., BISERNI, C. & FLACCO, G. 2010. Solar Thermal and Biomass Energy. University of Bolonga, Italiy: WIT Press.

29. LOZANOFF, J. E. A. 2007. Bioenergía Revisión de Tecnologías Emergentes. Buenos Aires.

30. PÉREZ DE ALEJO, H., PEREZ, A., CORRALES, Y., PÉREZ, O., CURVELO, T., GONZÁLEZ, Y., GOZA, O., MARRERO, R. & 2009. El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos.

31. PÉREZ, R. 2005. Consideraciones medioambientalistas de la gasificación de biomasa cañera en un central azucarero.

32. PERRY, R. 1998 Chemical Engineers' Handbook.

33. PETERS, M. 1991. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Fourth Edition ed.: McGraw-Hill Book Co.

34. PONZ, A. 1987. Termodinámica Técnica para ingenieros químicos, La Habana, Pueblo y Educación.

35. PUIGJANER, L. 2011. Syngas from Waste. Emerging Technologies. Barcelona: British Library.

36. REYES, J. P., R; BETANCOURT, J 2003. La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental. Centro Azúcar. Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera.

37. RODRÍGUEZ, G. 2009. Análisis de la base energética del polo industrial de la empresa azucarera Antonio Sánchez. Propuesta y evaluación técnico económico de variantes para la integración energética. Tesis de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

38. RODRÍGUEZ, M. & CORVALAN, P. La utilización potencial de la biomasa forestal en Chile como fuente de energía.

39. RODRÍGUEZ, P. 1997. Manual de cálculo rápido para la industria azucarera, La Habana, Ministerio de Economía y Planificación.

40. ROIG, J. 1974. Plantas medicinales, aromáticas y venenosas de Cuba, La Habana, Editorial Ciencia y Técnica

41. ROQUE, P. 1990. Combustión. Santa Clara: Edición interna de La Universidad Central de Las Villas.

42. ROSABAL, J. M. 2006. Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas, La Habana, Félix Varela.

43. RUBIO, A. 2000. Generadores de Vapor. Funcionamiento y explotación. Santa Clara.

44. SILVA, L. 2005. Plantaciones forestales energéticas en el proceso de la cogeneración de energía en los ingenios azucareros de Nicaragua.

45. SMITH, J. M. & VAN NESS, H. C. 1979. Introduction to chemical engineering thermodynamics, La Habana, Editorial Pueblo y Educación.

46. SNV, S. H. D. C. A. D. 2008. Cultivos para la producción sostenibles de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos. Modulo V Caña de azúcar.

47. TORRES, J. 2007. La biomasa cañera y el tránsito en Cuba hacia una energética sustentable. Cubaenergía, 35.

48. TORRES, J. & LARSON, E. 1995. Estimaciones sobre la producción de electricidad en los ingenios cubanos.

49. ULRICH D. G 1985. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química

50. VALDÉS, A. & ROQUE, P. 2009. Generación y cogeneración de electricidad a partir de la biomasa cañera.

51. VERDECIA, A., PÉREZ, F., MATA, I., ROQUE, P. & RUBIO, A. 2005. El uso de los Residuos Agrícolas Cañeros, RAC, como combustible en Cuba. Oportunidades.

52. VILCHES, L. 2013. Conferencia sobre la misión de las asesorías en proyectos de fábricas. Central azucarero Song Cong Sugar Factory.Tanky.Nghe An. Viet Nam.

53. ZC, B. H. & 2005. Improving the value of sugarcane bagasse wastes via integrated chemical production systems: an environmentally friendly approach.

54. http://educasitios2008.educ.ar/

55. (http://energiabiomasa-09.blogspot.com/2009/09/historia-de-la-biomasa.html

56. http://es.wikipedia.org/wiki/Biomasa

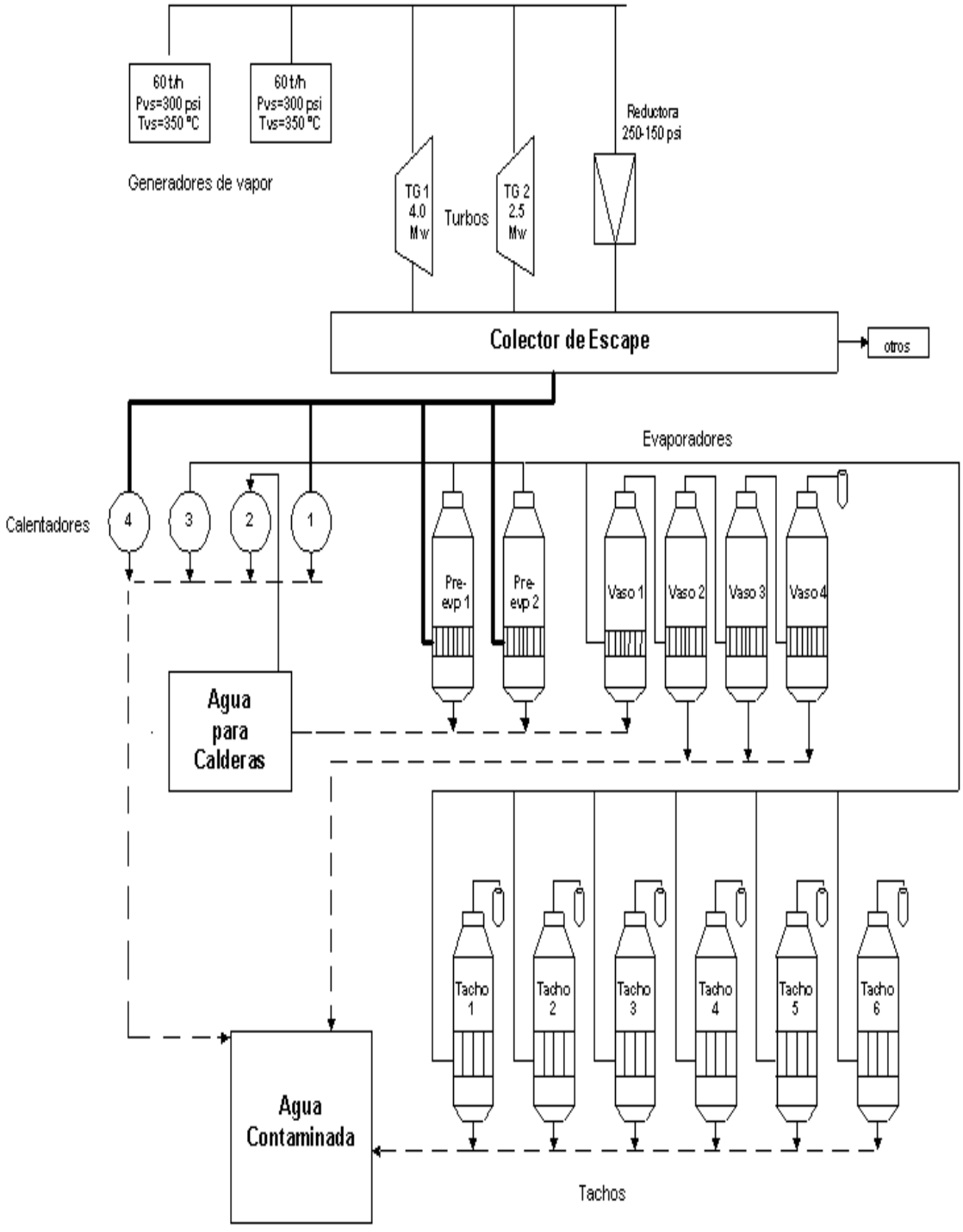
57. http://www.economiadelaenergia.com/2011/03/biomasa

58. http://www.ecured.cu/index.php/Biomasa

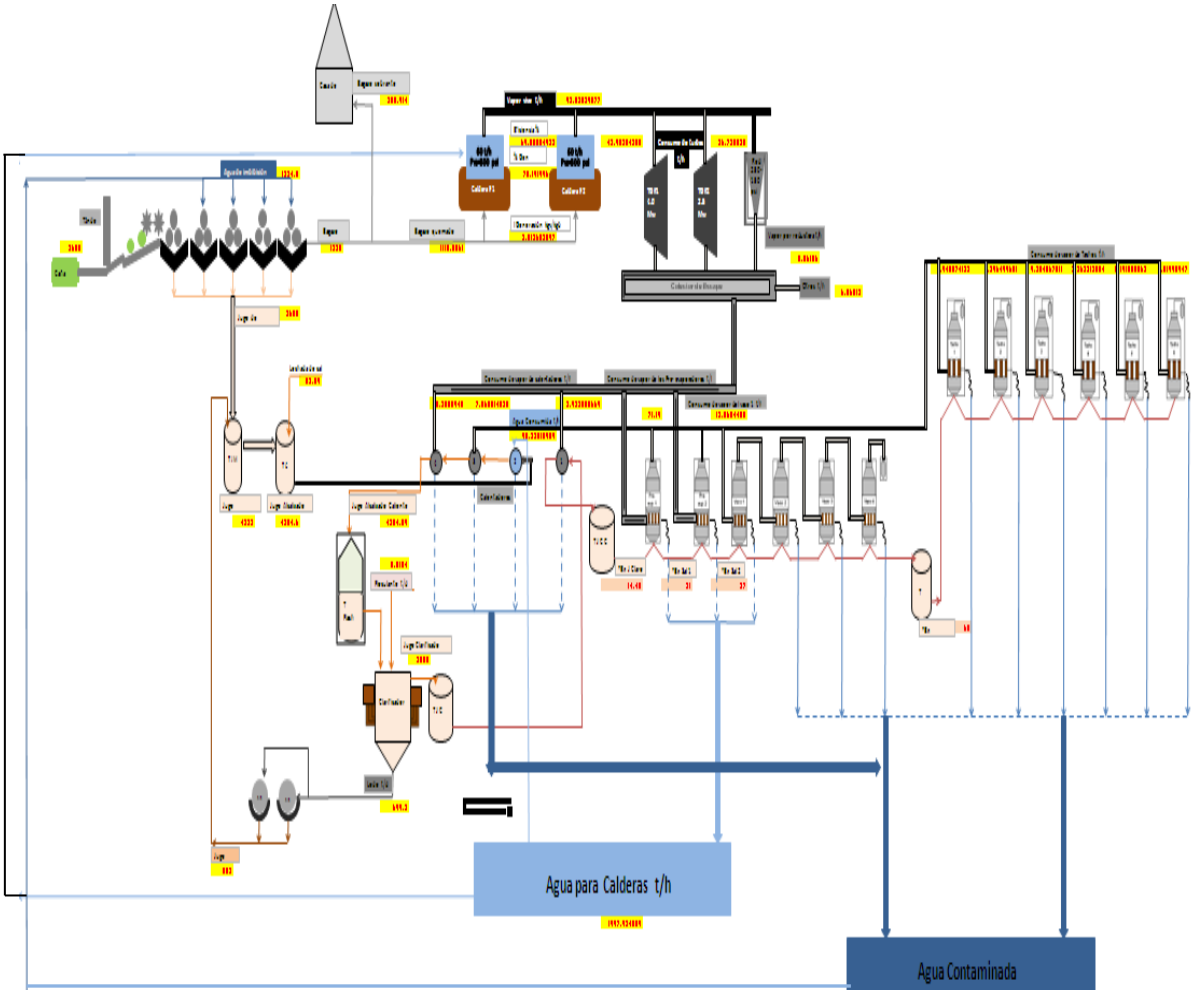
59. http://www.proenergia.com

Anexos

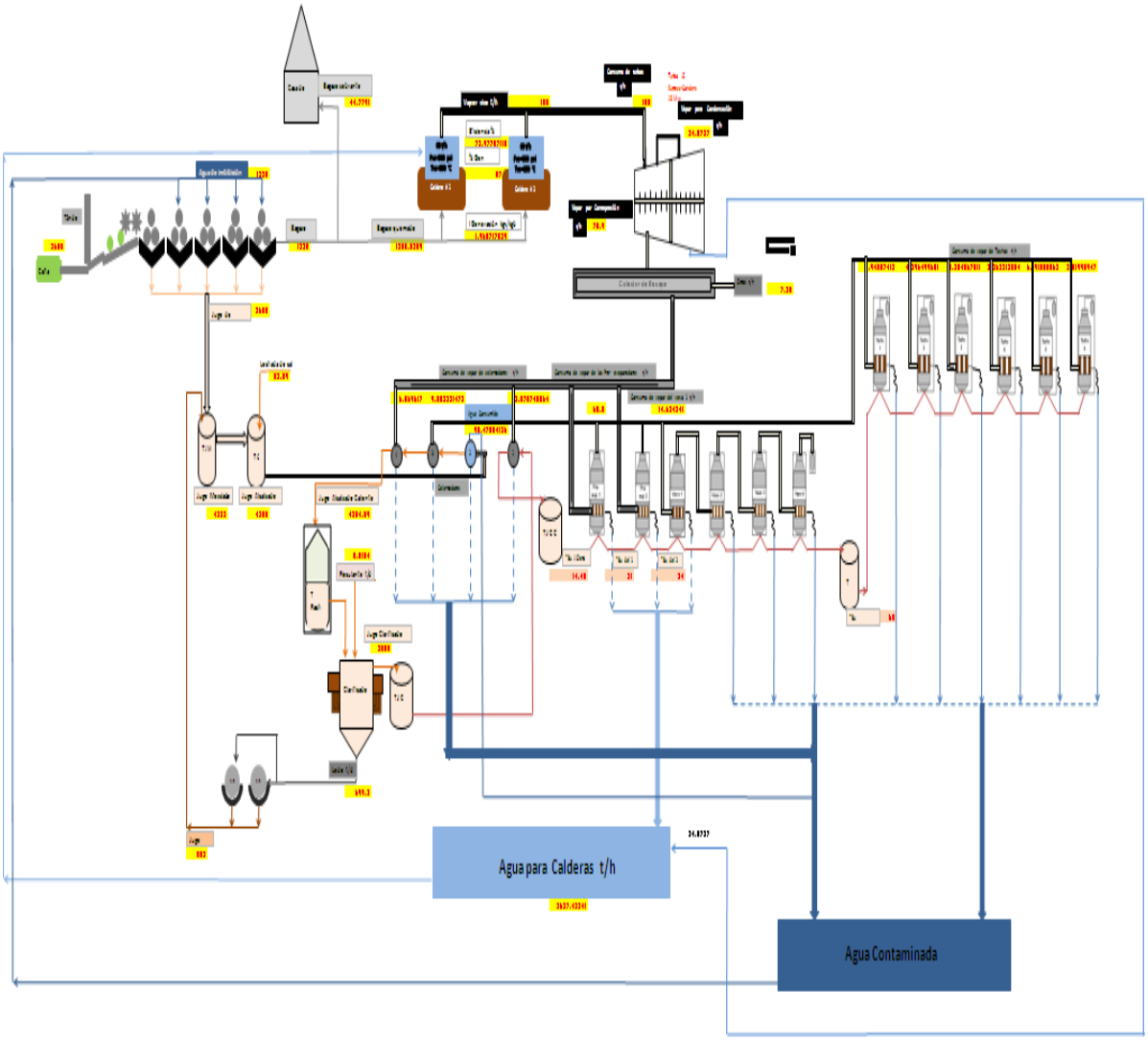
Anexo 1: Diagrama de distribución del vapor en las condiciones actuales



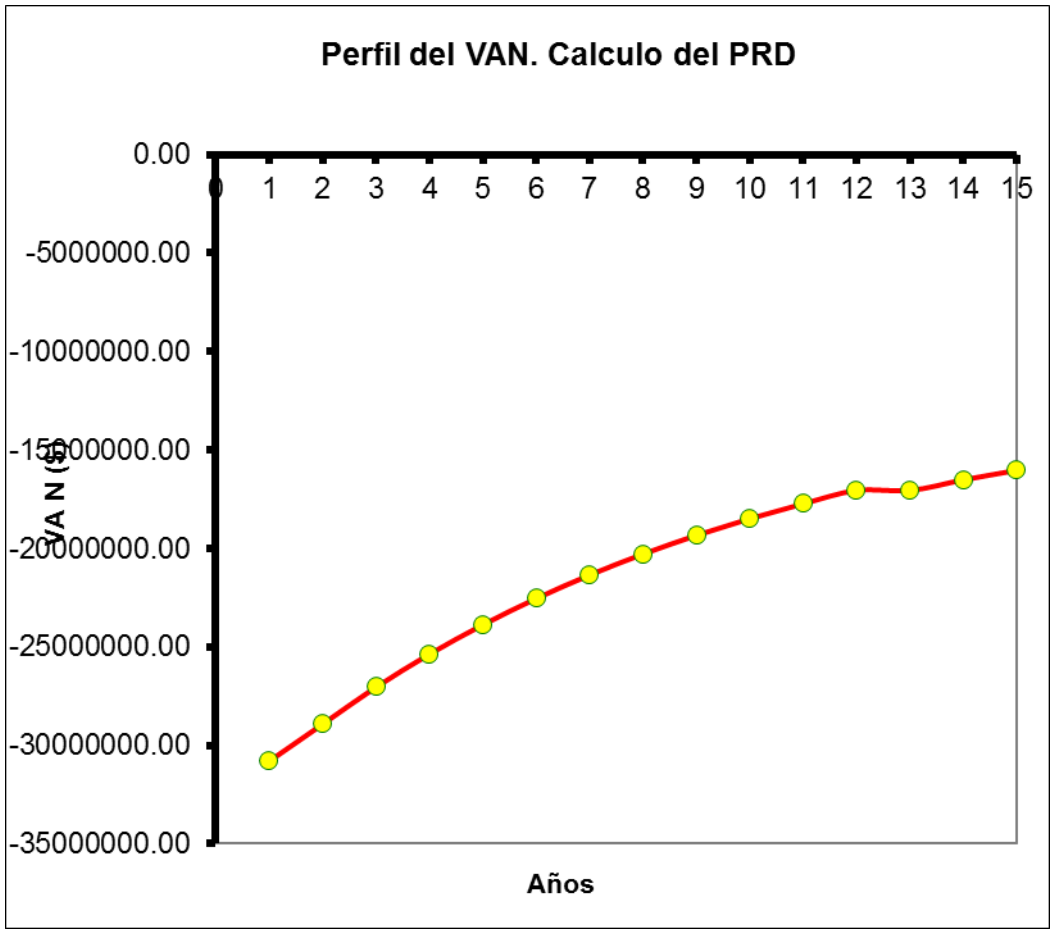
Anexo 2: Diagrama del proceso utilizado en el software Excel de las condiciones actuales



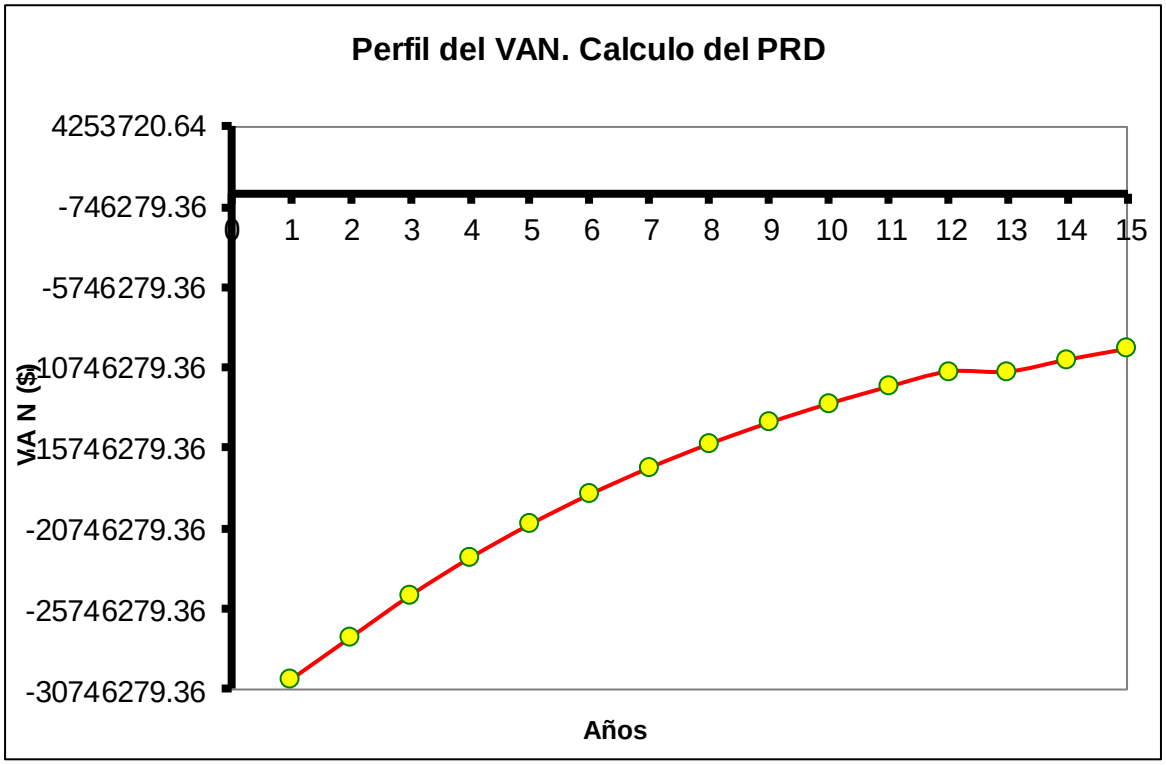
Anexo 3: Diagrama del proceso utilizado en el software Excel con el montaje del turbo de extracción- condensación.



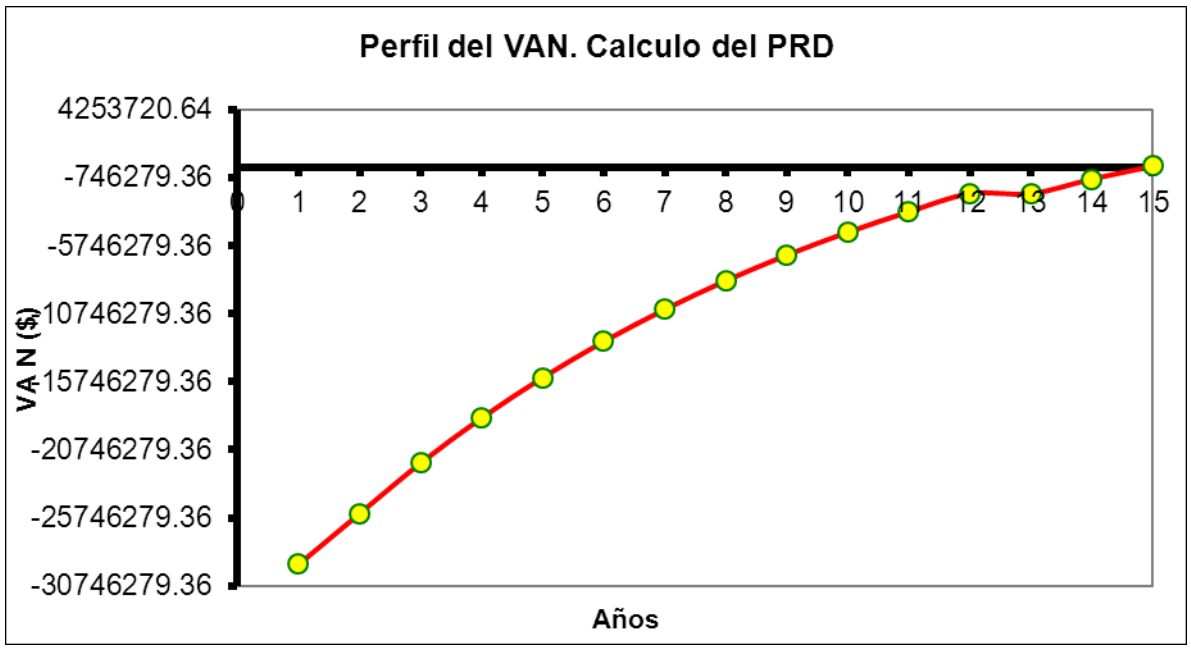
Anexo 4: Cálculo del perfil del VAN para la variante I(A1)



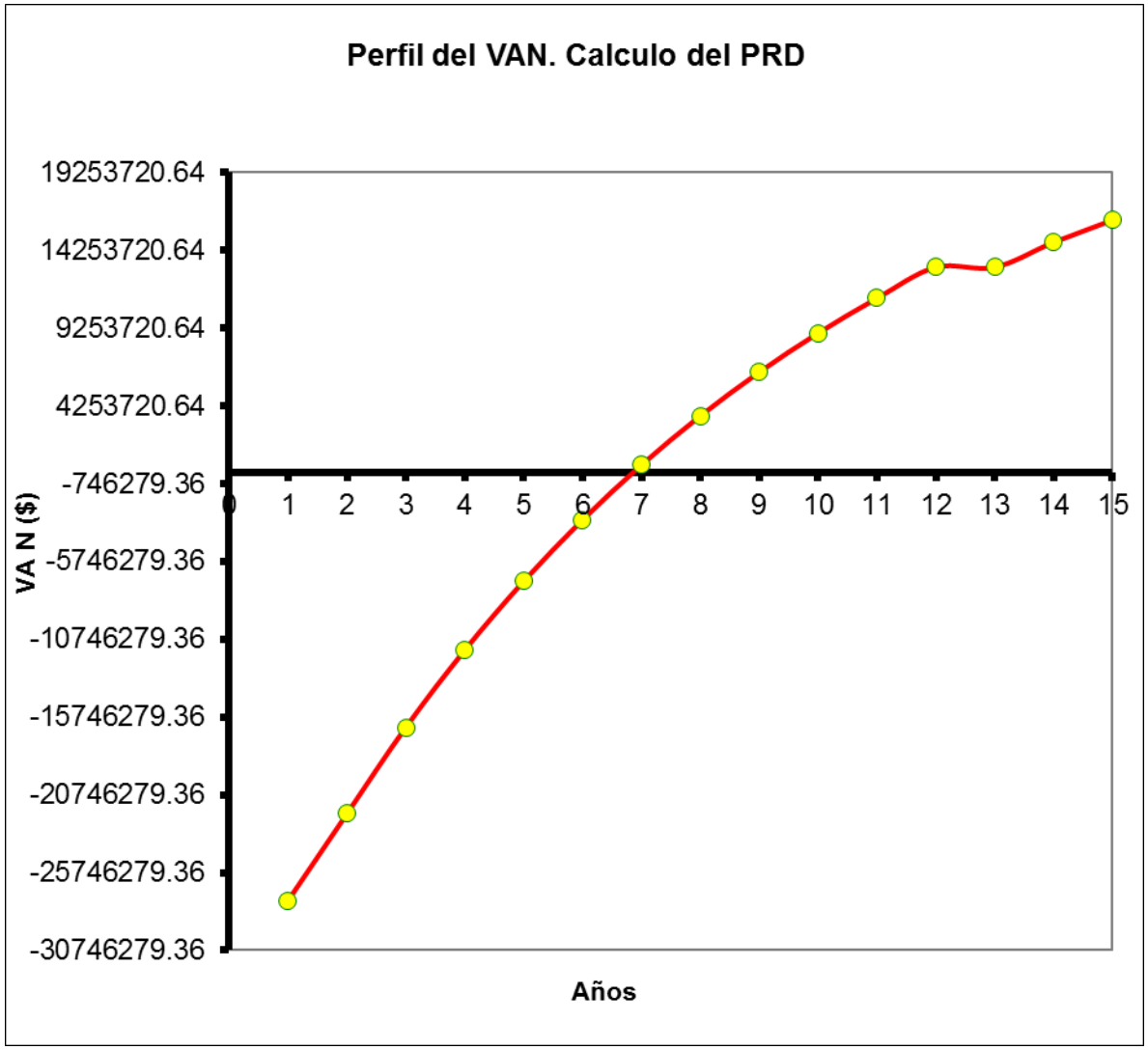
Anexo 5: Cálculo del perfil del VAN para la variante I(A2)



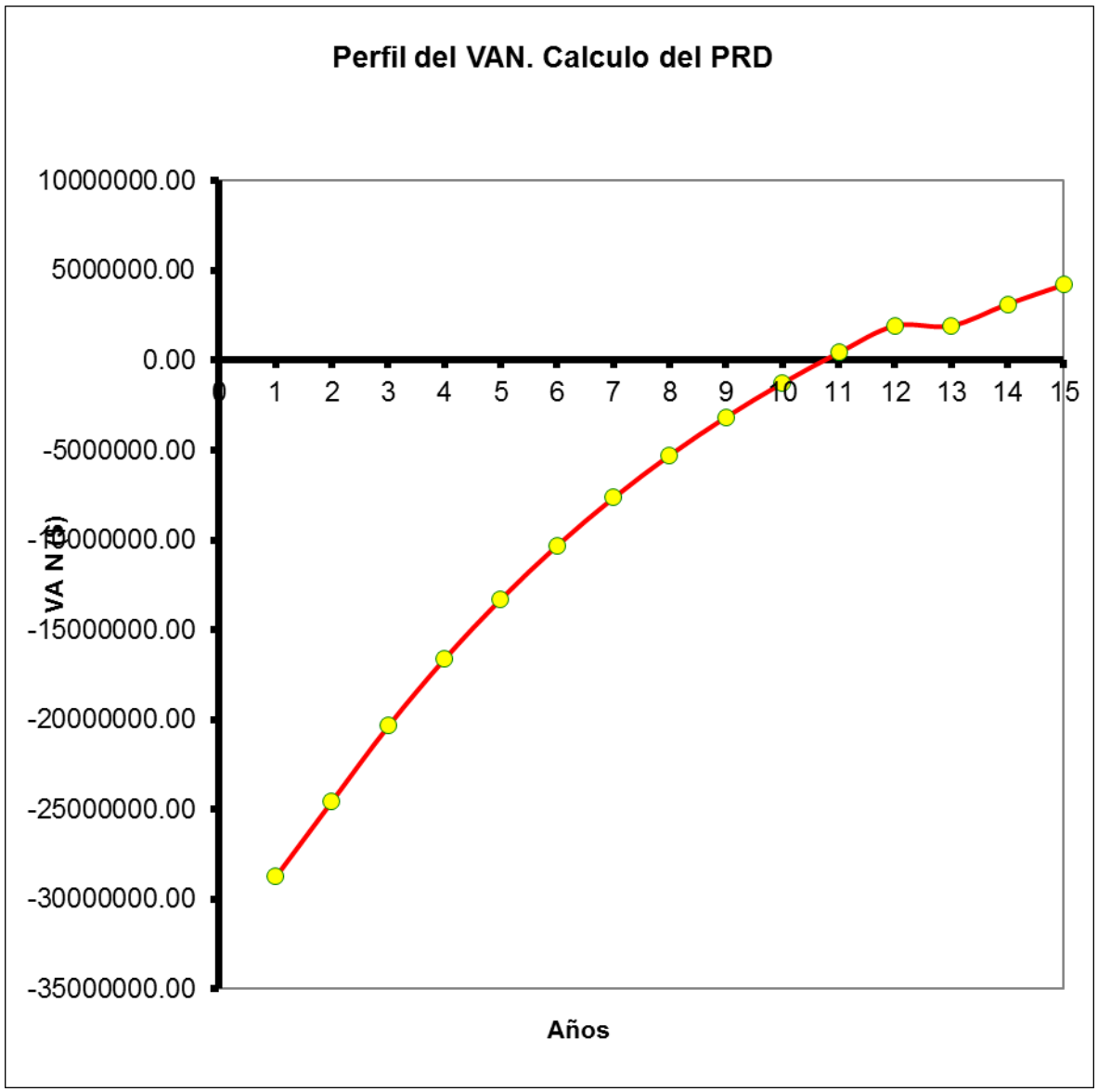
Anexo 6: Cálculo del perfil del VAN para la variante I(A3)



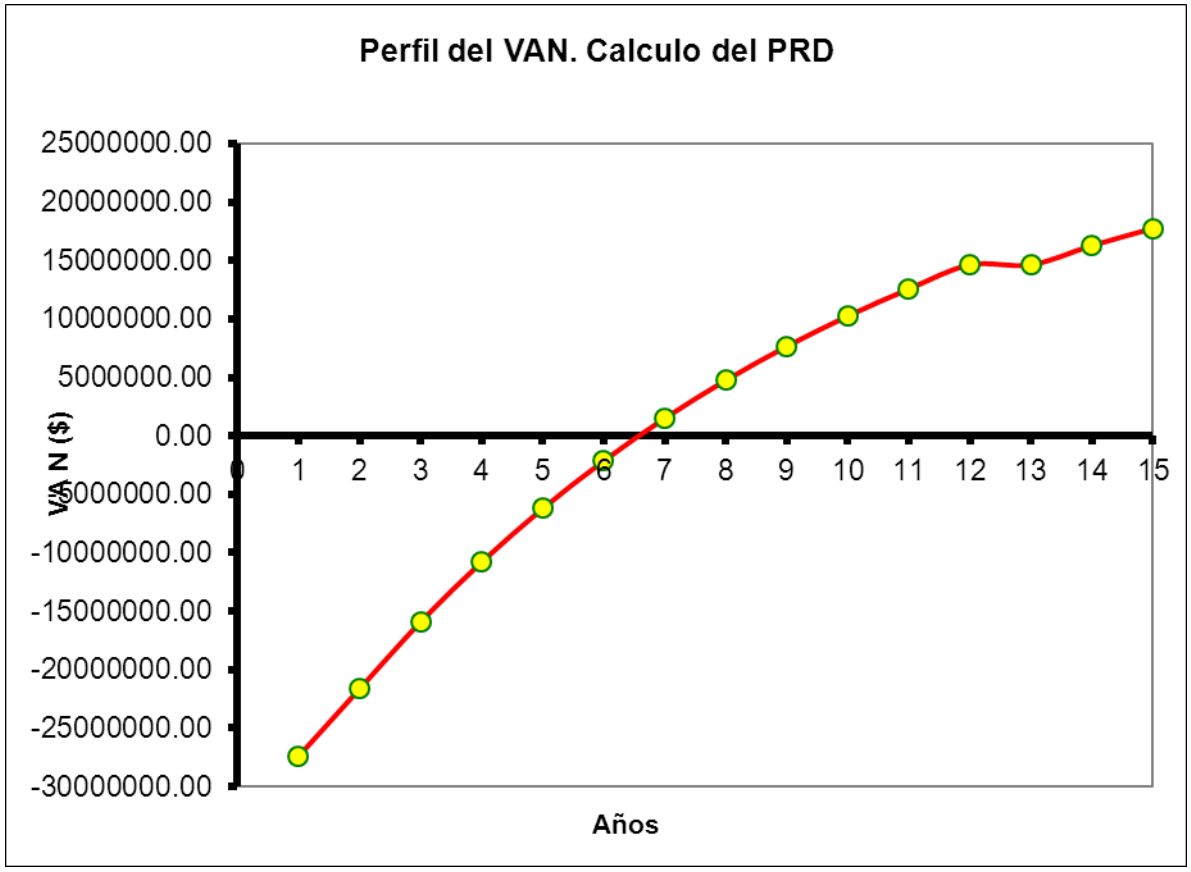
Anexo 7: Cálculo del perfil del VAN para la variante I(A4)



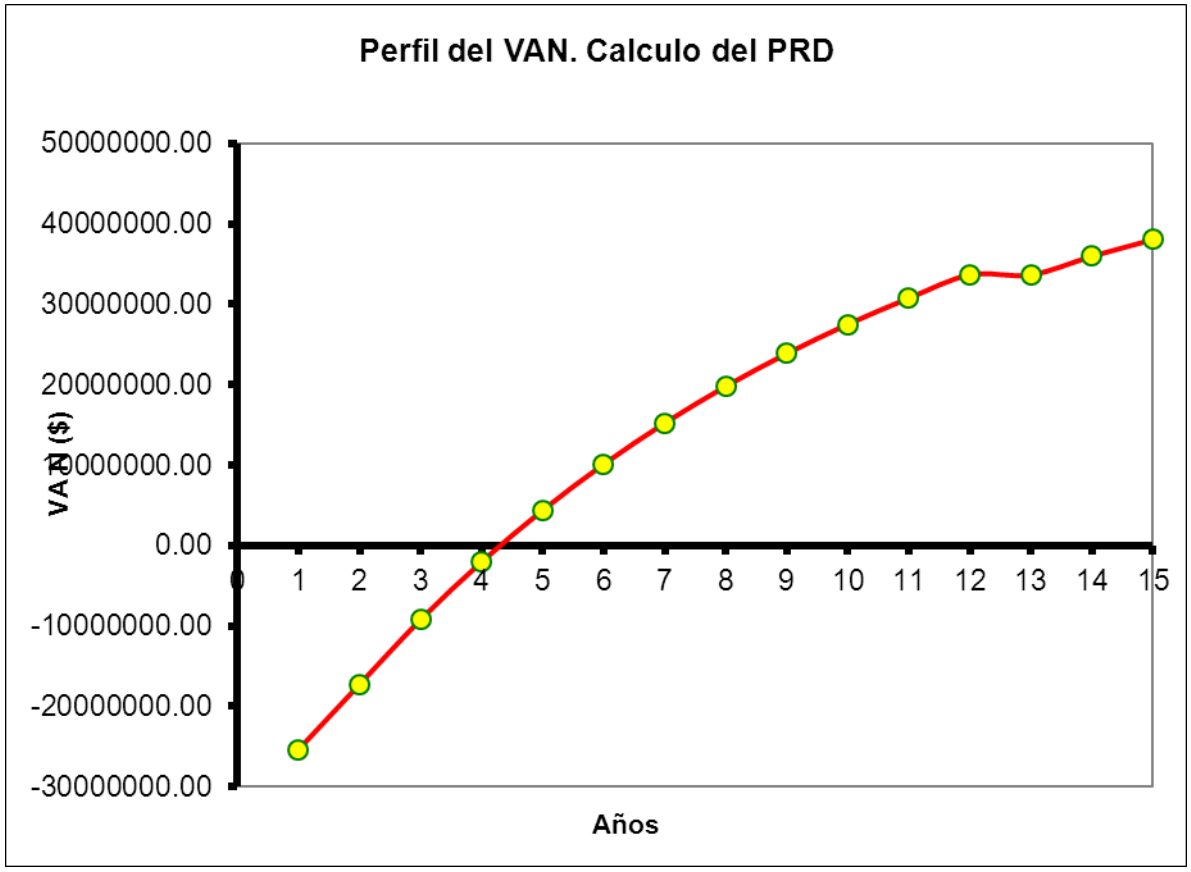
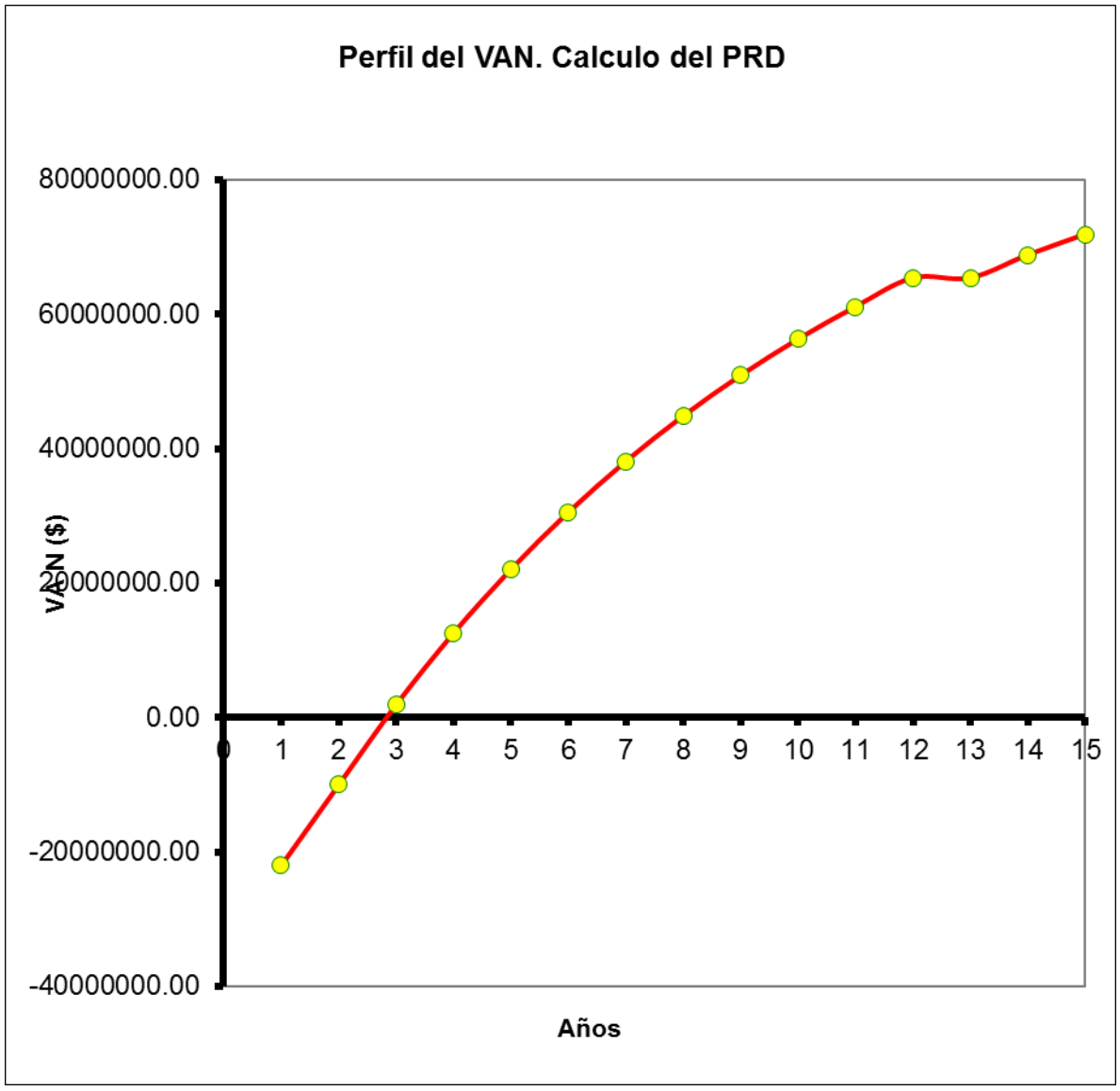
Anexo 8: Cálculo del perfil del VAN para la variante II(A1)



Anexo 9: Cálculo del perfil del VAN para la variante II(A2)



Anexo 10: Cálculo del perfil del VAN para la variante II(A3)



Anexo 11: Cálculo del perfil del VAN para la variante II(A4)