

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Propuesta de medidas en la UEB "George Washington" para aumentar la eficiencia energética.

Autor: Raisel Lara Cubertier

Tutores: Dr. C. Jorge Leiva Mas

MSc Ing. Liván Carlos Hernández Días

Santa Clara , Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT

DIPLOMA THESIS

Title: Proposed measures in the UEB "George Washington" to increase energy efficiency.

Author: Raisel Lara Cubertier

Thesis Director: Dr. C. Jorge Leiva Mas

MSc Ing. Liván Carlos Hernández Días

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

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

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

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

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419.

Pensamiento

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en lo bello y maravilloso del saber.

Albert Einstein

Dedicatoria

A mi mamá, mi hermano y mi abuela que me apoyo durante todo este tiempo.

A mis amigos de Mayajigua en especial los hermanos Triana que son como mis hermanos mayores.

Mis vecinos que siempre creyeron en mí.

A mi papá por ser una persona tan especial.

A mi novia Yamile por ayudarme y apoyarme en los momentos más difíciles.

Agradecimientos

A mi mamá Lázara por su apoyo incondicional, a mi hermano Enmanuel y mi abuela Dignora por estar presentes cuando los necesité.

A mi novia Yamile por apoyarme

A todos mis compañeros de grupo por la buena convivencia.

A mis compañeros de cuarto por ser una familia para mí durante estos cinco años.

A todos mis amigos por estar siempre presentes en los momentos difíciles.

A mis tutores, en especial a Jorge Leiva Mas por sus consejos y su apoyo en la realización de este proyecto.

A todo el claustro de Ingeniería Química

A los técnicos de laboratorio Noel y Dayán.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una caracterización general del central George Washington perteneciente a la Empresa azucarera AZCUBA de Villa Clara, se presenta el esquema energético del proceso y sus parámetros fundamentales. Se calculan los índices energéticos básicos que definen la eficiencia del central, para este análisis se tomaron datos de trabajos realizados en años anteriores, así como balances de masas y energía realizados en la presente zafra. Se compararon los índices calculados con los reportados en la literatura. Se proponen un grupo de medidas para mejorar los indicadores de eficiencia energética: desvío del jugo de los filtros para otros usos industriales y la inversión de evaporadores de película y tachos continuos; en lo relativo a las inversiones se realiza un análisis económico dando como resultado la factibilidad de utilizar evaporadores continuos de forma experimental en la industria azucarera cubana. En el caso de tachos continuos es preciso continuar estudios para definir su factibilidad. Se realizan análisis de sensibilidad para las inversiones propuestas.

Palabras claves: eficiencia energética; evaporadores; tachos.

Abstract

In the present work a general characterization of the George Washington plant belonging to AZCUBA Sugar Company of Villa Clara is made, the energy scheme of the process and its fundamental parameters is presented. The basic energy indices that define the efficiency of the power plant are calculated, for this analysis data from work carried out in previous years were taken, as well as mass and energy balances carried out in the presentation. The calculated indices were compared with those reported in the literature. A group of measures is proposed to improve energy efficiency indicators: diversion of juice from filters for other industrial uses and the investment of film evaporators and continuous pans; As regards the versions, an economic analysis is carried out, resulting in the feasibility of using continuous evaporators experimentally in the Cuban sugar industry. In the case of continuous pans it is necessary to continue studies to define its feasibility. Sensitivity analyzes are carried out for the proposed investments.

Keywords: energy efficiency; evaporators; buckets.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Revisión bibliográfica.....	4
1.1 Generalidades de la caña de azúcar.....	4
1.1.1 Caña de azúcar.....	4
1.1.2 Cultivo de la caña de azúcar.....	5
1.1.3 Principales países productores de caña de azúcar.....	5
1.1.4 Usos de la caña de azúcar.....	5
1.1.5 Subproductos derivados de la caña de azúcar.....	6
1.2 Producto principal de la caña (Azúcar).....	7
1.2.1 Azúcar crudo.....	8
1.2.2 Azúcar refino.....	8
1.3 Proceso general de producción de azúcar.....	9
1.3.1 Molienda.....	9
1.3.2 Clarificación.....	9
1.3.3 Evaporación.....	9
1.3.4 Cristalización.....	9
1.3.5 Separación o centrifugación.....	10
1.3.6 Refinado.....	10
1.3.7 Secado.....	10
1.3.8 Envasado.....	10
1.4 Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar.....	11
1.5 Generalidades de los principales equipos consumidores de vapor.....	11
1.5.1 Evaporadores.....	12
1.5.2 Sistemas de tachos utilizados industrialmente.....	20
1.6 Otros equipos vinculados con el vapor en la industria.....	24
1.6.1 Generadores de Vapor.....	24
1.6.1.1 Función de un generador de vapor.....	24
1.6.1.2 Turbinas de vapor.....	26
1.6.2 Turbinas de vapor.....	26
1.7 Productos químicos empleados.....	28
1.8 Conclusiones parciales.....	29
Capítulo 2. Descripción del proceso y la tecnología instalada.....	30
2.1 Caracterización general de la fábrica.....	30
2.2 Descripción del proceso de azúcar refino en la UEB George Washington.....	33

2.3 Descripción de Sistema Termoenergético.....	36
2.4 Bases de datos utilizadas.....	39
2.5 Balances realizados en el proceso de producción de azúcar crudo.....	39
2.5.1 Balance de masa en el proceso de producción de azúcar crudo.....	39
2.5.2 Balance de energía en el proceso de producción de azúcar crudo.....	41
2.6 Índices fundamentales de consumo de vapor en la producción de azúcar crudo.....	41
2.7 Balances realizados en el proceso de producción de azúcar refino.....	42
2.8 Índices fundamentales de consumo de vapor en la producción de azúcar refino.....	48
2.9 Conclusiones parciales.....	48
Capítulo 3. Análisis de los resultados.....	50
3.1 Análisis de los resultados.....	50
3.1.2 Comparación de los índices de la literatura con los índices determinados ..	50
3.2 Medidas propuestas para minimización de consumo de vapor en la industria	51
3.3 Evaluación económica de las medidas propuestas.....	52
3.3.1 Efecto de la extracción del jugo de los filtros.....	52
3.3.2 Inversión de evaporadores de película descendente. Evaluación económica.....	52
3.3.3 Resultados Variante I.....	55
3.3.4 Resultados Variante II.....	56
3.3.5 Análisis de las variantes.....	57
3.3.6 Análisis de sensibilidad.....	57
3.4 Evaluación económica de los tachos continuos.....	60
3.4.1 Resultados de la variante.....	61
Recomendaciones.....	65
Bibliografía.....	66
Anexos.....	69

Introducción

La producción azucarera es un renglón económico importante del país, pues el azúcar continúa siendo una fuente de exportación. Actualmente el mayor por ciento de la producción de azúcar se produce a partir de la caña. Por eso se ha necesitado desarrollar esta rama de la economía, tanto en el sector agrícola como industrial.

En el caso de Cuba la agroindustria azucarera es la primera del país, y aunque el turismo y otras alternativas de producción han crecido de forma acelerada, continúa siendo la mejor alternativa dentro del sector agrícola, tanto por nuestras condiciones naturales, como por la tradición y la cultura azucarera del país y la existencia de mercados que tradicionalmente han recibido la azúcar cubana y donde sigue siendo bien recibida. Constituye, además un importante polo de desarrollo, al estar diseminada a todo lo largo de la isla, y generar a su alrededor empleos y ocupaciones diversas, relacionadas con la propia industria y con los núcleos de población que la rodean(<http://www.fao.org>). El desarrollo y transformación de la industria azucarera cubana abarca varios períodos. A partir de la reestructuración en el MINAZ se han logrado pasos de avances significativos en la superación cultural e integral de sus trabajadores, lo cual obliga a aumentar la eficiencia industrial y la calidad de la materia prima basándose en los adelantos científicos técnicos.

El presente trabajo se realiza en la Unidad Empresarial de Base “George Washington”, que se encuentra ubicada en el municipio de Santo Domingo y pertenece a la Empresa Azucarera Villa Clara del grupo AZCUBA.

Debido al agotamiento de las fuentes energéticas, la obsolescencia y deterioro del equipamiento existente en el central y a la tendencia mundial de disminución de los precios del azúcar, se hace necesario la búsqueda de alternativas donde se aprovechen más los recursos disponibles, se disminuya el consumo energético y se reduzcan los costos.

Por lo anterior se realiza un análisis en los principales equipos consumidores de vapor en el central George Washington para detectar las principales deficiencias y proponer mejoras tecnológicas al proceso. Se analiza la factibilidad de cambios en proceso, así como las inversiones de equipamiento tecnológico novedoso. Estas medidas deben conllevar un ahorro de recursos materiales y económico dado por la

intensificación del proceso productivo. Se busca, además, adecuar el central para la posible inversión de una bioeléctrica, lo que representa un salto tecnológico significativo.

Problema Científico:

En la industria azucarera cubana existen potencialidades de ahorro de portadores energéticos, hay equipos que presentan obsolescencia tecnológica lo que no favorece una alta eficiencia. No se han introducido en la industria novedosas tecnologías referidas a los procesos evaporativos y de cristalización que son aplicadas en otros países.

Hipótesis:

Es posible mejorar la eficiencia energética de las fábricas de azúcar mediante la inversión de equipamiento tecnológico novedoso en áreas de equipos grandes consumidores de vapor.

Objetivo general:

Proponer medidas tecnológicas que intensifiquen la eficiencia energética en la industria azucarera cubana.

Objetivos específicos:

- Calcular los consumos específicos de vapor en los principales equipos que definen la eficiencia energética
- Proponer posibles inversiones de equipamiento tecnológico novedoso que permita la intensificación del proceso energético en la industria azucarera cubana.
- Realizar la evaluación económica preliminar de las medidas propuestas.

Estrategia para la realización de la investigación

- Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se desarrollará un diagnóstico tecnológico en la empresa según las normas establecidas. Se obtendrán los datos fundamentales y se analizarán mediante análisis estadísticos para aumentar la confiabilidad de los mismos.

- Se realizará una búsqueda en internet de los principales equipos que se ofertan en el mercado azucarero actual con el objetivo de intensificar los procesos energéticos.
- Se realizarán los análisis técnicos y económicos correspondientes para conocer la viabilidad de los proyectos propuestos.
- Con el trabajo se tendrán criterios preliminares sobre posibles inversiones en la industria azucarera cubana, referida a equipos novedosos, como evaporadores de película y tachos continuos.

Capítulo 1. Revisión bibliográfica

1.1 Generalidades de la caña de azúcar

1.1.1 Caña de azúcar

La caña de azúcar es el nombre común de esta especie de herbáceas, de tallo leñoso de género (*Saccharum*) perteneciente a la familia de las gramíneas (*Gramineae*), con origen genético en Nueva Guinea. Fue introducida en Cuba por el año 1535 desde Santo Domingo y se cultiva mucho en países tropicales y subtropicales de todo el mundo por el azúcar que contiene en los tallos, formados por numerosos nudos.

La planta alcanza entre tres y seis metros de altura y entre dos y cinco centímetros de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo y en el tallo se acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis a través de las hojas que pueden alcanzar de dos a cuatro metros de longitud (ECURED, 2018).

El tronco de la planta constituye la parte más importante y está compuesto por una parte sólida (fibra) y una líquida (jugo) que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Las proporciones de sus componentes varían de acuerdo con la variedad de la caña (familia), edad, madurez, clima, suelo, método de cultivo, abonos, lluvias, riegos, etc. El tiempo desde el corte hasta la molienda determina la calidad de la caña que se alimenta al central. Con su corte se rompe el equilibrio del ser vivo y comienzan a desencadenarse, por un lado, un conjunto de reacciones de descomposición e inversión y por el otro, al perderse el mecanismo de defensa de la planta, el ataque de toda la flora microbiana. El resultado de todo ello es la pérdida del azúcar de la caña, la formación de ácidos orgánicos y un conjunto de polisacáridos que se desarrollan a expensas del contenido de sacarosa de la caña. Estos componentes indeseables, de los cuales el más conocido y dañino es la dextrana que induce adicionalmente serias complicaciones en el proceso y pérdidas adicionales (ECURED, 2018), por lo que se debe garantizar un menor tiempo desde

que es cortada hasta que se procese en el central con el fin de aprovechar al máximo su contenido de sacarosa.

1.1.2 Cultivo de la caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta tropical que se desarrolla mejor en lugares calientes y soleados, por lo que la temperatura, la humedad y la luminosidad, son los principales factores del clima que controlan el desarrollo de la planta. Cuando prevalecen temperaturas altas, la caña de azúcar alcanza un gran crecimiento vegetativo y bajo estas condiciones la fotosíntesis se desplaza hacia la producción de carbohidratos de alto peso molecular, como la celulosa y otras materias que constituyen el follaje y el soporte fibroso del tallo. Es indispensable también proporcionar una adecuada cantidad de agua a la caña durante su desarrollo que permita la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes. La caña de azúcar se cultiva con éxito en la mayoría de suelos, estos deben contener materia orgánica y presentar buen drenaje tanto externo como interno y que su pH oscile entre 5,5 a 7,8 para su óptimo desarrollo, se han reportado buenos resultados de rendimiento y de azúcar en suelo de textura franco limoso y franco arenoso(www.ecured.cu).

1.1.3 Principales países productores de caña de azúcar

Como es un cultivo tropical, la gran mayoría se cultiva en América Latina, India y el Lejano Oriente, aunque muchos países en África cultivan individualmente pequeñas superficies. De forma general se destacan Brasil, India, China, Tailandia y Pakistán por cultivar más de un millón(<https://www.portalcania.com>).

1.1.4 Usos de la caña de azúcar

La caña ha sido sembrada para producir azúcar solamente, la cual constituye su producto principal, sin embargo, tanto en su fase agrícola como industrial, genera una gran cantidad de subproductos que a su vez devienen materia prima de excelente calidad para múltiples renglones tanto de consumo nacional como para la exportación(Anónimo, 1988). La disponibilidad de estas materias primas para diversas producciones eleva el valor agregado del azúcar, el cual es un producto básico, esencial y necesario en la dieta alimenticia y constituye la materia prima para numerosas industrias, tales como confiterías, panaderías, bebidas no alcohólicas y alcohólicas. Por otra parte, se encuentran productos que constituyen alternativas de

sustitución de otros con gran impacto ecológico adverso (cemento, papel obtenido a partir de pulpa de madera, etc.).

Los residuales y subproductos de esta industria. En este sentido es importante señalar el empleo de la cachaza como fertilizante, las mieles finales y los jugos del proceso de producción de azúcar pueden emplearse para la producción de alcohol, lo que permite disponer de un combustible líquido de forma renovable y la incorporación de los derivados tradicionales (tableros aglomerados, papel y cartón, cultivos alternativos para alimento animal y mieles finales).

En efecto, esa planta, por su gran capacidad de captar la luz solar y transformarla en biomasa aprovechable, ofrece grandes posibilidades al desarrollo sostenible en los países de las zonas tropical y subtropical que la cultivan. Según expertos, su importancia presente y para el futuro inmediato no está, exclusivamente, en lo que representa el valor del azúcar como alimento para la economía de quien la produce, ella radica, además, y de manera creciente, desde el punto de vista energético, en el aprovechamiento de la biomasa con vistas a aportar electricidad, alcohol, alimento animal y una gama más amplia aún de otros derivados(www.cuba.cu).

1.1.5 Subproductos derivados de la caña de azúcar

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

- Bagazo: Es el residuo separado después de la extracción del jugo de la caña de azúcar y es el principal subproducto de la industria azucarera, representando el 30 por ciento de los tallos verdes molidos(GONZÁLEZ, 2006). La tecnología para la producción del azúcar indica que la materia prima trae en el bagazo el combustible necesario para la fábrica de azúcar, pudiendo entregar combustible y energía térmica o eléctrica después de satisfacer sus propias necesidades.
- Miel final: Se llama miel final o miel de purga al subproducto proveniente de la centrifugación de la masa cocida de tercera. Además de los azúcares no cristalizados, las mieles finales contienen compuestos orgánicos y sales inorgánicas que pasan a esta a través del proceso de fabricación. Se

destinan principalmente para la alimentación animal y usos industriales, por lo general, en la producción de alcohol etílico, ron y levaduras.

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

La nueva tecnología de los últimos años ha ampliado sensiblemente este grupo de subproductos, actualmente se producen decenas de productos a partir de los derivados de la industria azucarera (ICIDCA, 2016), Cuba mediante la transferencia tecnológica y la investigación científica tiene varios proyectos encaminados a este fin.

1.2 Producto principal de la caña (Azúcar)

El azúcar es un endulzante de origen natural, sólido, cristalizado, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa. El azúcar blanco es un alimento muy puro con más del 99 por ciento de sacarosa, mientras que, el azúcar crudo posee un contenido menor de sacarosa (94 por ciento) pues conservan aún parte de la miel a partir de la cual fueron fabricados. El azúcar, además de ser uno de los principales derivados de la caña, es uno de los alimentos que más aportan calorías al cuerpo. Es una fuente de energía eficiente, económica, pura y a la vez un alimento muy útil. Pocas veces se consume en forma directa siendo lo usual adicionarlo a otros alimentos para mejorar su sabor, textura y cuerpo (bebidas, jugos, helados), utilizarlo como preservante (leche, frutas, jamones) y como mejorador de la apariencia (panadería, pastelería). Ningún otro edulcorante puede realizar todas las funciones del azúcar con su costo y facilidad, características que lo hacen indispensable para muchos de los alimentos más populares (ECURED, 2018).

Se clasifica en dependencia de los procesos aplicados a la extracción como, crudo, mascabado o morena: se produce en cristales de mayor tamaño y conserva una película de melaza que envuelve cada cristal; blanco directo y blanco especial: se producen por procesos de clarificación y su producción final se logra en una sola

etapa de clarificación y por último se encuentra el azúcar refinado, se cristaliza dos veces con el fin de lograr su máxima pureza(Cabello, 2006).

1.2.1 Azúcar crudo

Se define como azúcar crudo, al obtenido directamente a partir del jugo de la caña sin aplicar procedimientos o aditivos especiales para su blanqueo.

En estas condiciones obtenemos por un proceso casi tradicional el azúcar crudo, que es básicamente una materia prima para refinerías u otros procesos que así lo requieran; en esta clasificación se pueden producir varios tipos de azúcares en función de las especificaciones que soliciten los diferentes mercados(E.Hugot, 1980). Atendiendo a esta estructura en Cuba tradicionalmente se han 4 tipos de azúcares crudos, en función de las especificaciones que soliciten los diferentes mercados, las características básicas de esas producciones son las siguientes:

El crudo estándar en nuestra producción principal y por ello la más voluminosa. Se caracteriza por ser un azúcar de una polarización mínima de 97.50 ° y está dirigido a un mercado muy amplio.

Se producen tres tipos de azúcares de alta calidad, alta calidad como tal, afinado y crudo de consumo doméstico. Para mercados de refinado tanto nacionales como de exportación con determinadas especificaciones de pol, color e insolubles y algún otro parámetro que por requerimientos de determinado mercado sea necesario establecer(MINAZ, 2017).

1.2.2 Azúcar refinado

La caña de azúcar es sometida a los procesos de refinación mediante pasos repetidos de lavado, cocción, centrifugación y secado. Luego de esto casi todos los elementos nutritivos de la planta se han perdido. Lo que queda en el azúcar en bruto (sacarosa), que forma los cristales blancos que llamamos azúcar refinada(<https://yasalud.com>, 2010).

1.2.2.1. Efectos del azúcar refinado en el organismo

El consumo de azúcar refinada está involucrado directamente en muchos trastornos y enfermedades. Se asocia a la diabetes, a la obesidad, a los problemas cardíacos, hepáticos y renales. También a trastornos psicológicos, como la depresión, los ataques de pánico, la angustia, adicción al azúcar, etc(<https://www.vix.com>, 2019).

1.3 Proceso general de producción de azúcar

En el mundo existen diferentes criterios de cómo se obtiene la azúcar, pero todos basados en principios similares, los cuales se describen a continuación (ICIDCA, 2017):

1.3.1 Molienda

La caña es sometida a un proceso de preparación que consiste en romper las celdas de los tallos. Luego unas cintas transportadoras la conducen a los molinos, donde se realiza el proceso de extracción de la sacarosa.

El bagazo sale del último molino hacia las chimeneas, para usarlo como combustible, o al depósito de bagazo, de donde se despacha para usarlo como materia prima en la elaboración de papel.

1.3.2 Clarificación

El jugo proveniente de los molinos, pasa al tanque, donde se rebaja su grado de acidez. Allí se guarda.

El jugo alcalinizado se bombea a los calentadores, donde se eleva su temperatura hasta un nivel cercano al punto de ebullición.

Luego antes de pasar a los clarificadores va a un tanque de flasheo abierto a la atmósfera, en el cual pierde entre 3 y 4 grados centígrados por acción de evaporación natural, también se cambia la velocidad del jugo de turbulento a laminar. En los clarificadores se sedimentan y decantan los sólidos. Los sólidos decantados pasan a los filtros rotatorios, trabajan con vacío y están recubiertos con finas mallas metálicas que dejan pasar el jugo, pero retienen la cachaza, que puede ser usada como abono en las plantaciones.

1.3.3 Evaporación

Luego el jugo clarificado pasa a los evaporadores, que funcionan al vacío para facilitar la ebullición a menor temperatura. En este paso se le extrae el 75 % del contenido de agua al jugo, para obtener el producto o meladura.

1.3.4 Cristalización

El cocimiento de la sacarosa que contiene el jarabe se lleva a cabo en tachos al vacío. Estos cocimientos, producirán azúcar crudo (para producción para animales),

azúcar blanco (para consumo directo) o azúcar para refinación. La cristalización del azúcar es un proceso demorado que industrialmente se aumenta introduciendo al tacho unos granos de polvillo de azúcar finamente molido.

1.3.5 Separación o centrifugación

Los cristales de azúcar se separan de la miel restante en las centrífugas. Estas son cilindros de malla muy fina que giran a gran velocidad. El líquido sale por la malla y los cristales quedan en el cilindro, luego se lava con agua. Las mieles vuelven a los tachos, o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol etílico en la destilería. El azúcar de primera calidad retenido en las mallas de las centrífugas, se disuelve con agua caliente y se envía a la refinería, para continuar el proceso. Cabe resaltar que en este punto se obtiene lo que se llama azúcar rubio, debido al color de los cristales; a continuación, se detalla el proceso mediante el cual el azúcar rubio se convierte en azúcar blanco o azúcar muy fino.

1.3.6 Refinado

Mediante la refinación, se eliminan los colorantes o materias inorgánicas que el licor pueda contener. El azúcar disuelto se trata con ácido y sacarato de calcio para formar un compuesto que arrastra las impurezas, las cuales se retiran fácilmente en el clasificador. El licor resultante se concentra, se cristaliza de nuevo en un tacho y se pasa a las centrífugas, para eliminar el jarabe.

1.3.7 Secado

El azúcar refinado se lava con condensadores de vapor, se seca con aire caliente, se clasifica según el tamaño del cristal y se almacena en silos para su posterior envasado.

1.3.8 Envasado

El azúcar crudo de exportación sale directamente de las centrífugas a los silos de almacenamiento. Allí se lleva al puerto de embarque o bien se envasa en sacos de 50 kg para ser utilizado en la fabricación de alimentos concentrados para animales.

El azúcar refinado se envasa en presentación de 5, 500, 1000, 2500 y 3000 gramos; 50, 100 y 150 kilogramos e incluso por tonelada.

1.4 Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo con una representación estándar del proceso de producción de azúcar. En los anexos 1 y 2 se representa este proceso de producción en diagramas de bloque.

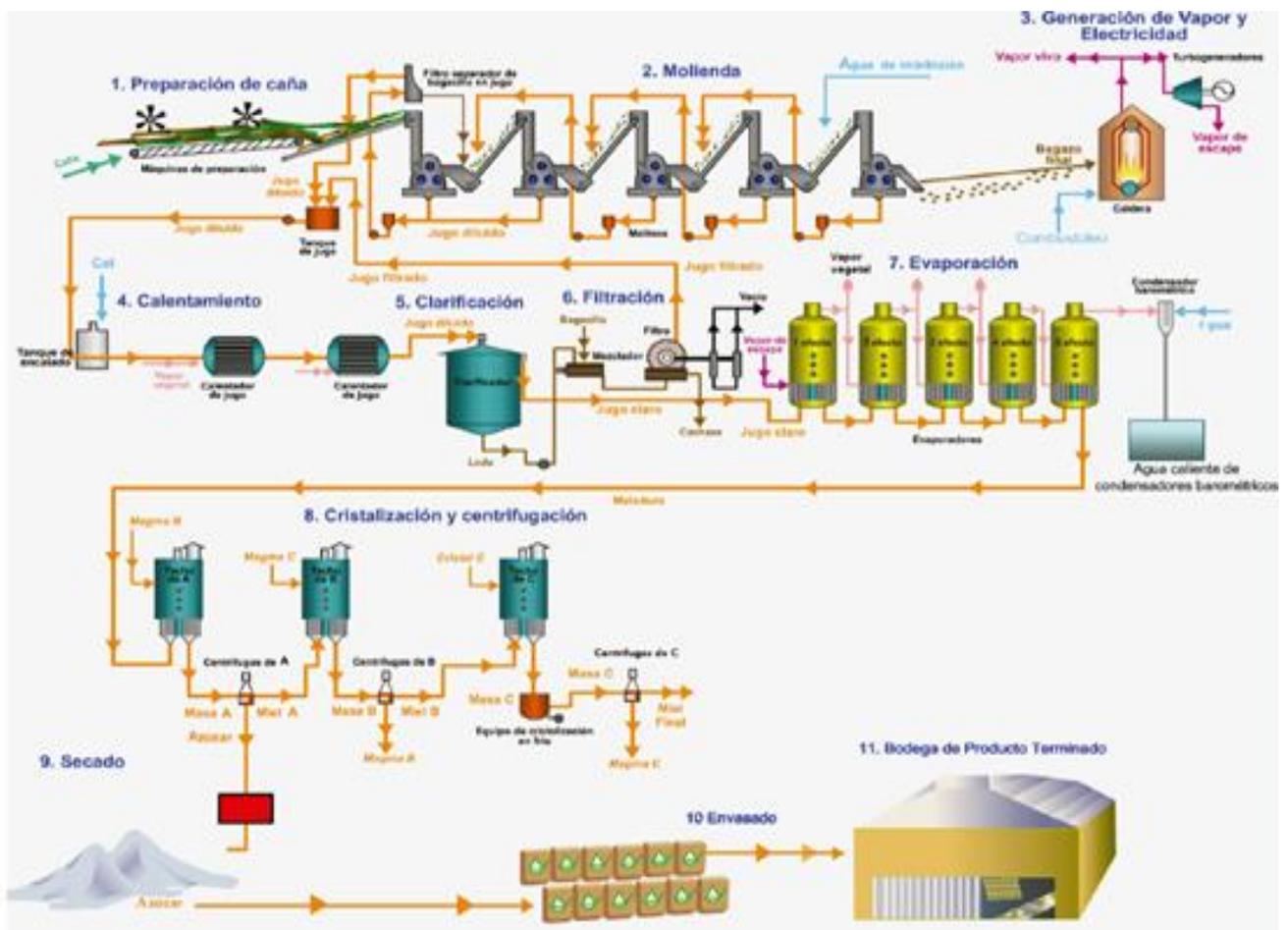


Figura 1 Diagrama de flujo estándar del proceso de producción de azúcar.

Fuente: ICIDCA. Proceso de producción de azúcar (ICIDCA, 2017).

1.5 Generalidades de los principales equipos consumidores de vapor

El vapor es el estado de agregación de la materia en el que las moléculas interactúan débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares adoptando la forma y el volumen del recipiente que las contiene y tendiendo a expandirse todo lo

posible, es decir, que es la fase gaseosa de una sustancia a diferencia de que ésta se encuentra por debajo de su temperatura crítica.

El vapor es el elemento calefactor por excelencia de las fábricas de azúcar, se emplea en diferentes condiciones en el proceso tecnológico, en los siguientes epígrafes se describen de forma elemental el equipamiento donde mayormente es utilizado(<https://www.ecured.cu>, 2019).

1.5.1 Evaporadores

La transferencia de energía en forma de calor es común en las diferentes etapas de la producción de azúcar. La transferencia de energía se produce del medio con la temperatura más elevada hacia el medio con la temperatura más baja, a la razón o velocidad a la cual se transfiere este calor se le llama transferencia de calor. Esta transferencia se detiene cuando ambos medios están a la misma temperatura(Baloh, 1995).

La transferencia de calor de un líquido en ebullición recibe el nombre general de evaporación. En la evaporación se elimina el agua de una solución acuosa.

El proceso de evaporación en la producción de azúcar consiste en la conexión de varios evaporadores (múltiple efecto) ya sea en serie, paralelo o una combinación de ambos. La decisión del número de efectos y su conexión se basan en la capacidad del ingenio.

Para comprender el proceso de evaporación de múltiple efecto, es necesario comprender cómo funciona un evaporador individualmente o como efecto simple.

- **Evaporadores de efecto simple.**

Un evaporador de efecto simple se refiere a que la evaporación del fluido se hace en un solo evaporador. La solución acuosa entra al evaporador a una temperatura T_f en el tubo de intercambiador de calor en donde entra el vapor de agua a una temperatura T_s , que es la temperatura del vapor de agua saturado.

El vapor condensado sale en forma de pequeños chorros con una temperatura T_1 .

Se supone que la solución en el evaporador está completamente mezclada y dentro del evaporador la solución tiene la misma composición y misma temperatura T_1 , que corresponde al punto de ebullición de la solución.

La temperatura del vapor también es T_1 pues está en equilibrio con la solución a ebullición. Mientras que la presión P_1 es la presión de vapor de la solución a una temperatura T_1 .

Es decir, que tanto la solución como el vapor que se genera de la ebullición y el producto condensado tendrán una misma presión y una misma temperatura debido al equilibrio que hay con la solución que se evapora.

Si se supone que la solución que se va a evaporar es bastante diluida y parecida al agua, 1 kg de vapor de agua condensándose evaporará aproximadamente 1 kg de vapor de agua de solución, esto será cierto siempre que la alimentación tenga una temperatura T_f cercana al punto de ebullición(GEANKOPLIS).

La figura 2 muestra las propiedades de cada flujo que entra y sale del evaporador de simple efecto.

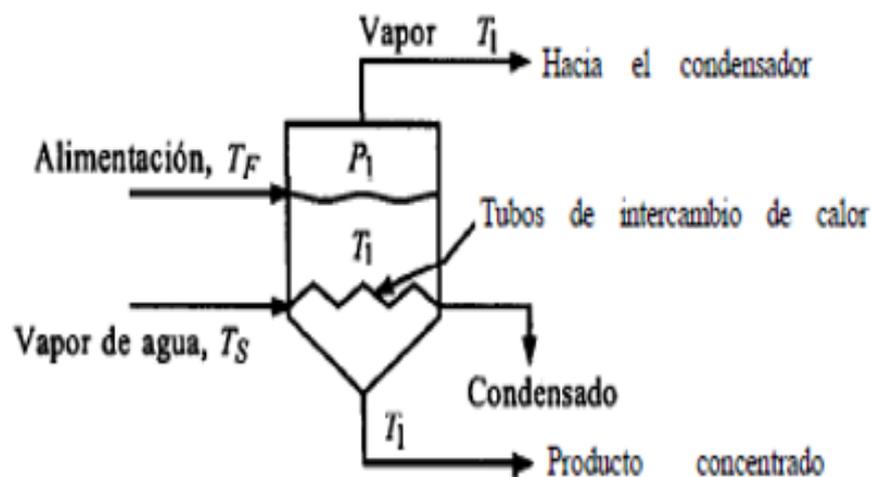


Figura 2: Diagrama de un evaporador de simple efecto

Fuente: GEANKOPLIS, Christie. Procesos de transporte y operaciones unitarias.

Sin embargo, este tipo de evaporación genera una gran pérdida del vapor que se obtiene de la evaporación del agua de la solución. Por tanto, este no es utilizado en la industria azucarera.

- **Evaporadores de efecto múltiple.**

Los evaporadores de efecto múltiple se refieren a que la evaporación se llevará a cabo en un conjunto de evaporadores conectados en serie o en paralelo; según convenga; asimismo el flujo de la solución acuosa y del vapor va en paralelo o contracorriente.

En la industria azucarera se prefiere utilizar evaporadores de efecto múltiple conectados en serie y con flujo paralelo, ya que se obtiene un ahorro de vapor de escape y se evapora la mayoría de agua, ya que la cantidad de sólidos disueltos (Brix) alcanza un rango de 65 a 68 %.

Por otra parte, el rango o el Brix máximo que alcanza el licor depende de su grado de saturación, es decir, que no es mayor a la concentración de saturación, debido a que si este límite se excede, el licor empezará a cristalizarse dentro del evaporador.

Los evaporadores de efecto múltiple funcionan muy parecidos a los de efecto simple. La diferencia radica en que el vapor que se obtiene en el primer efecto alimenta al segundo efecto, donde hay una nueva evaporación de la solución, el vapor obtenido de esta nueva evaporación alimenta al tercer efecto, se repite este procedimiento hasta el penúltimo efecto.

En el último efecto los vapores obtenidos de la evaporación se llevan a un condensador barométrico y la solución pasa a la siguiente etapa.

Debido a las sangrías que se realizan a todos los evaporadores del “tren” se logra un ahorro de vapor según los principios de Rillieux. El primero dice “en un evaporador multiefecto con N efectos, 1 kg de vapor evaporará N kg de agua” (Rain, 2012). Es decir, que con solo 1 kg de vapor de escape se evaporará 1 kg de agua de cada efecto.

El segundo principio dice “Cuando se efectúan extracciones de vapor desde el i -ésimo efecto en un tren de evaporador multiefecto de N efectos, para ser utilizados en reemplazo de escape en otra aplicación distinta de los evaporadores, el ahorro de vapor será i/N veces la cantidad de vapor utilizado para esta tarea” (Rain, 2012). Es decir, que la sangría de vapor de agua que sale del evaporador anterior se convierte en la alimentación de vapor del siguiente efecto, por lo que ya no es necesaria la inyección de vapor de escape, generando un ahorro en el vapor de escape que se obtiene de las turbinas.

El tercer principio que fue agregado por (Chou, 1993) que dice “En todo lugar donde se condense vapor o extracciones de vapor, se deben efectuar arreglos que permitan liberar continuamente los gases incondensables”. Se refiere a la necesidad de introducir un condensador barométrico para los gases.

La figura 3 muestra la configuración de un tren de evaporadores de múltiple efecto.

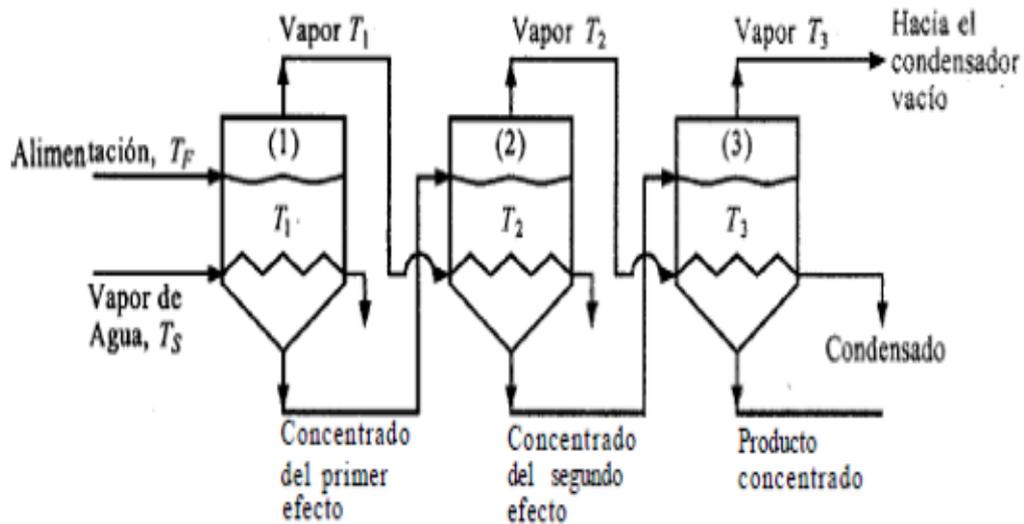


Figura 3: Diagrama de evaporadores de efecto múltiple

Fuente: GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*.

La temperatura T_f es la temperatura a la cual entra la solución al primer efecto. La temperatura T_1 va a ser igual para el vapor de escape y para la solución, porque se asume que la solución está bien homogeneizada dentro del evaporador, y que tanto el vapor como la solución están en equilibrio. Lo mismo sucede para la temperatura T_2 y T_3 .

Cabe mencionar que a través del tren de evaporación la presión tiende a disminuir y por ende la temperatura. Ambas disminuyen porque la presión de vapor que se recibe del efecto anterior es más baja. Si la presión es más baja significa que la temperatura de ebullición de la solución también disminuye porque la presión de vapor del agua debe llegar a la misma presión del ambiente a la que está sujeta para ebullicir.

Asimismo, el coeficiente de transferencia de calor de un efecto a otro va disminuyendo; esto se debe al hecho de que el fluido que entra al siguiente efecto está más concentrado, por ende está más viscoso; lo que dificulta el intercambio de calor (GEANKOPLIS).

1.5.1.1 Tipos constructivos fundamentales de evaporadores

Existe una gran variedad de evaporadores ya que se fabrican en diferentes tamaños y diseños por lo que también cambian sus componentes y su funcionamiento. A continuación, se describen algunos de ellos.

Evaporadores Robert

Son evaporadores de calandria con tubos verticales de 38 a 51 mm de diámetro y longitudes de tubo en el rango de 1,5 a 3 m. La mayoría de las calandrias cuentan con un tubo de diámetro mayor en el centro del evaporador, para mejorar la transferencia de calor y permitiendo la salida del líquido concentrado (Rain, 2012).

La evaporación por descomposición instantánea (evaporación *flash*), del líquido que entra promueve la circulación y la transferencia de calor.

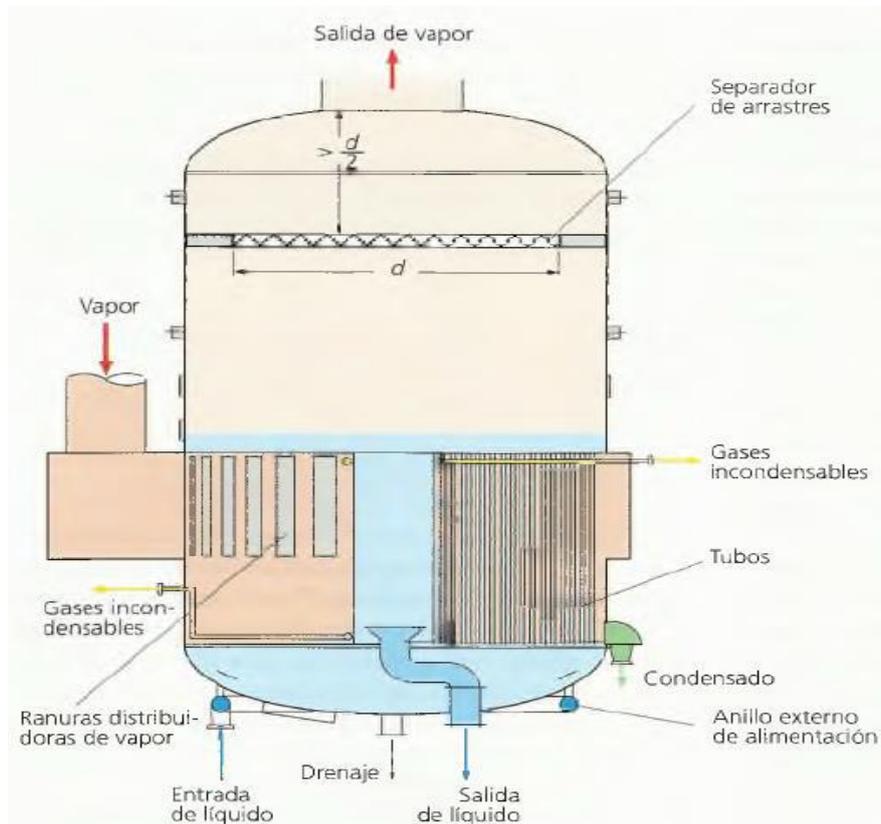


Figura 4: Evaporador tipo Robert

Fuente: RAIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 339.

Evaporadores Kestner

También se conocen como evaporador de tubos largos con película ascendente, se utiliza cuando se requiere una gran capacidad ya que proporciona arreglos de evaporación compactos empleando tubos de mayor longitud (6 a 7,5 m) (Rain, 2012).

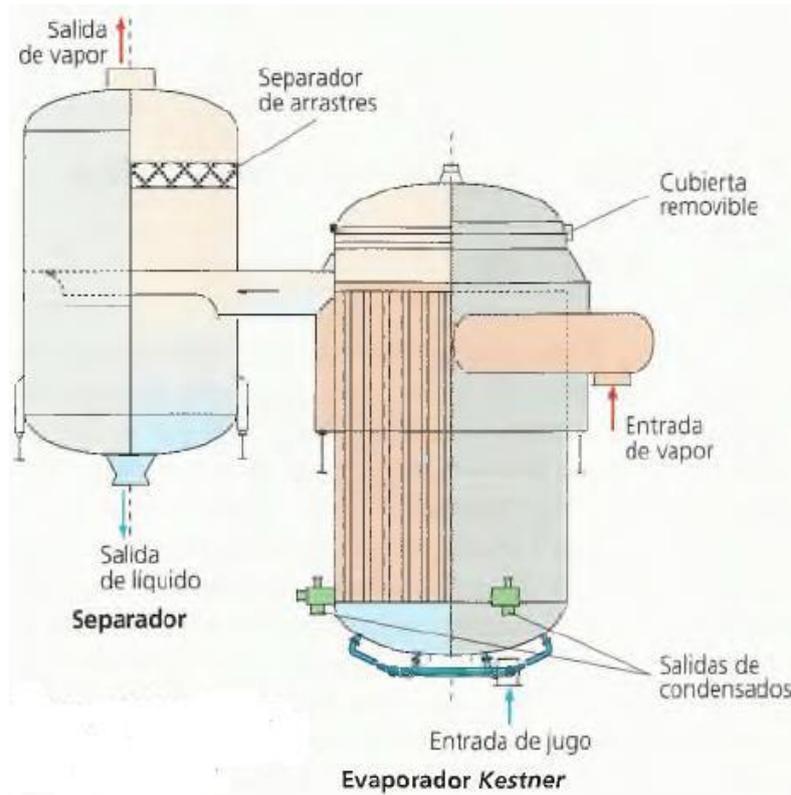


Figura 5: Evaporador tipo Kestner o evaporador de tubos largos con película ascendente

Fuente: RAIN, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. p. 339.

Evaporadores tubulares de película descendente.

Estos evaporadores son muy utilizados debido a su capacidad de trabajar con productos termosensibles como la sacarosa, por su alta eficiencia, economía, rendimiento y por elevados coeficientes de transferencia de calor.

Estos equipos son alimentados en la parte superior, generando una distribución homogénea del producto dentro de los tubos y así producir una película descendente de iguales características. Si esto no ocurre se produce una baja eficiencia de evaporación, ensuciamiento prematuro de los tubos y eventualmente un taponamiento de los mismos.

Dentro de los tubos se produce la evaporación parcial, y el producto que está siendo concentrado permanece en íntimo contacto con el vapor que se genera, ya que ambos fluidos que circulan en paralelo abandonan el equipo por la parte inferior; donde se produce la separación de las dos fases. El flujo concentrado pasa a las bombas, mientras que el vapor se envía a un condensador o al siguiente efecto(<http://www.gea-niro.com>).

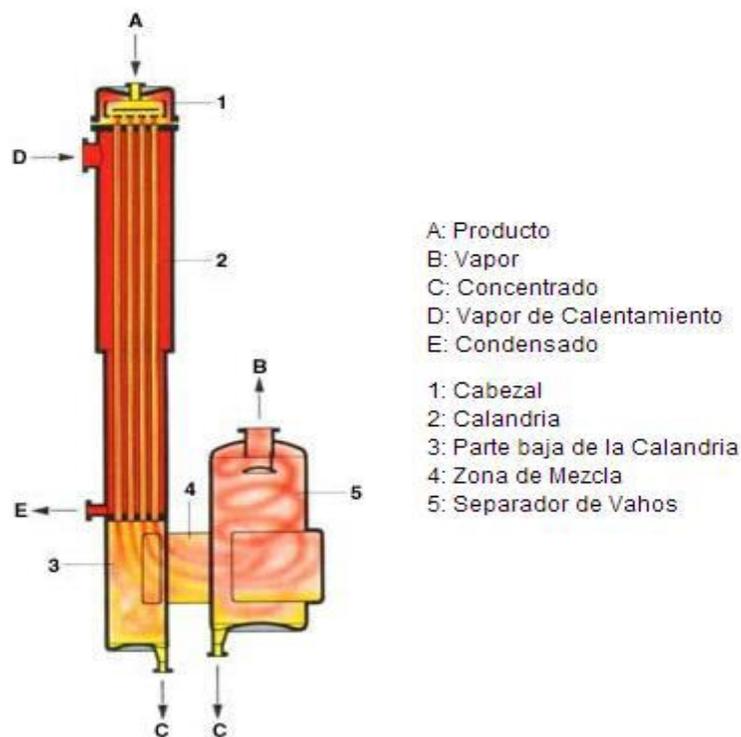


Figura 6: Evaporador tubular de película descendente

Fuente: GEA. Evaporadores película descendente. http://www.gea-niro.com.mx/lo-quesuministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp.

Ventajas de los evaporadores de película descendente

- Mayor coeficiente de transferencia de calor que evaporadores Roberts.
- Permite operar con ΔT (calandria/vaso) más pequeños.
- Produce vapores vegetales de mayor temperatura.
- Permite el uso de vapores de efectos posteriores en la fábrica(CASSA, 2017).
- Costo moderado en la gran mayoría de los evaporadores.
- Calefactores de gran superficie en un solo cuerpo.
- Bajo tiempo y volúmenes de residencia.
- Control de proceso y automatización simple(<https://www.monografias.com>).

Evaporador de placas

El evaporador de placas no es más que un intercambiador de calor que consta de una serie de placas con pasos corrugados y aplastados para el flujo.

Los fluidos caliente y frío se dan en pasos alternados, de este modo cada corriente de fluido frío queda rodeada por dos corrientes de fluido caliente, lo que da por resultado una transferencia más eficaz de calor.

La ventaja de este equipo es que se limpia únicamente con hervir agua dentro del evaporador.

Los evaporadores instalados en la refinería están compuesto de dos cubiertas de acero al carbono (la placa de la armazón y la placa de presión) entre los cuales las placas se presionan entre sí por medio de tornillos de apriete.

La placa de la armazón es estacionaria, mientras que la placa de presión es móvil a lo largo de la barra de transporte.

El evaporador está diseñado para una alta eficiencia de evaporación de película descendente. El líquido a evaporar entra a través de dos conexiones de alimentación ubicadas en el centro de la parte inferior de la unidad.

El líquido evaporado se eleva a través de los canales de la placa y sale del equipo a través de la conexión de la parte superior izquierda como una mezcla de líquido-vapor.

El medio de calentamiento es el vapor y entra a la unidad por la parte superior derecha y al transferir su calor abandona el sistema como agua (el vapor se condensa), a través de unos tubos conectados en la parte inferior.

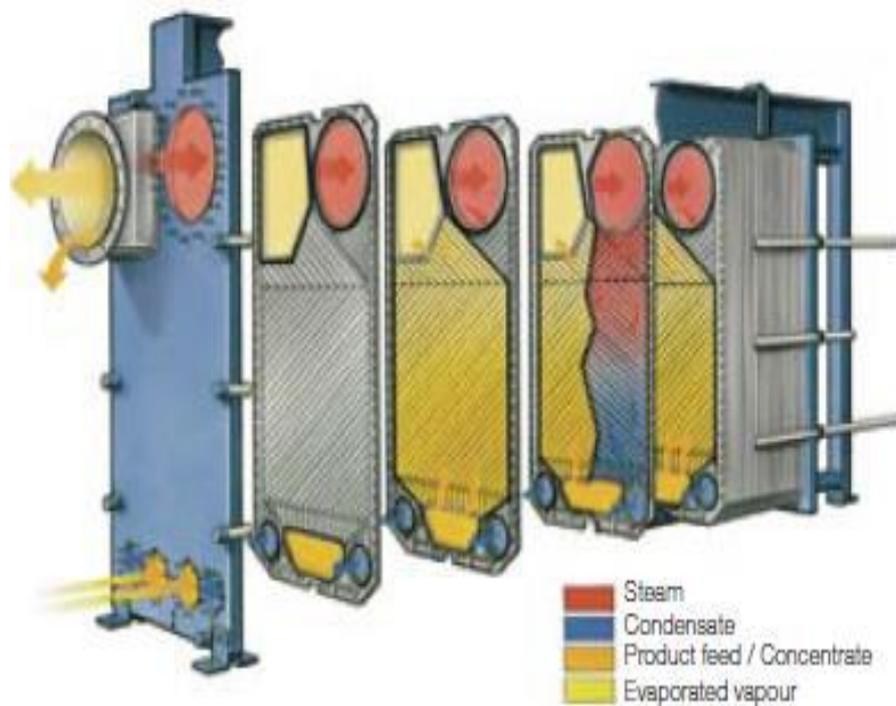


Figura 7: Evaporador de placas

Fuente: Alfa Laval. AlfaVaprang. Plateevaporators. p.1.

1.5.2 Sistemas de tachos utilizados industrialmente

Los tachos al vacío son equipos que se utilizan en la Industria Azucarera para la cocción de la meladura y las mieles provenientes de las centrífugas para obtener los granos de azúcar, dicho proceso se denomina cristalización(<http://sertrol.com>).

1.5.2.1 Funciones de los tachos

La función del tacho es la producción y desarrollo de cristales satisfactorios de azúcar a partir del jarabe del que se alimenta. Las cualidades deseables del azúcar están sujetas a la influencia de los tachos y de la forma en que se operan. La concentración inicial de los productos que se usan en tachos suele ser de 60 a 65 °Brix, y puede llegar a 74 °Brix en el trabajo de refinería. Las altas densidades disminuyen el consumo de vapor y la duración del ciclo, pero hacen que el control satisfactorio de las operaciones sea cuestión delicada que implica el peligro de la producción de conglomerados y falso grano.

1.5.2.2 Cristalización

La cristalización se realiza en los tachos, que son recipientes al vacío de un solo efecto. El material resultante que contiene líquido (miel) y cristales (azúcar) se denomina masa cocida. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos o templeas para lograr la mayor concentración de sacarosa.

1.5.2.3 Diseño de los tachos

Son tanques cilíndricos de acero que trabajan al vacío para facilitar la evaporación a bajas temperatura, pueden trabajar bajo un régimen continuo o como una estación independiente. Los Tachos al Vacío están diseñados para una baja carga hidrostática; utiliza templeas de alta y baja pureza; diseño de muy bajo volumen de pie de templa y amplia relación superficie calórica/volumen templa.

1.5.2.4 Materiales de construcción de los tachos

Antiguamente, el material común para la fabricación de cuerpos de tachos era el hierro fundido, pero hoy en día se usa casi exclusivamente la lámina de hierro dulce. Los serpentines y tubos de cobre proporcionan la mejor superficie calórica, pero se siguen usando mucho los tubos de hierro. Los tubos de hierro se oxidan por el lado expuesto al vapor, lo que disminuye notablemente la transmisión de calor.

El procedimiento reciente en la construcción de tachos para azúcar refinado ha sido uso de materiales anticorrosivos, para evitar que dicho azúcar lleve manchas de óxido, especialmente después de las paradas.

Patterson hizo un examen de los tachos de las refinerías norteamericanas, y encontró que aproximadamente la tercera parte de ellos estaban fabricados con láminas de hierro dulce y que de éstos, muchos llevaban tubos de acero. Si a esta cantidad se sumaban los cuerpos de hierro fundido existentes, el total ascendía a más de la mitad de todos los tachos examinados. Del azúcar blanco, eran de materiales anticorrosivos: lámina de hierro dulce con forro de acero inoxidable, la misma lámina con forro de níquel, lámina totalmente inoxidable, 6 lámina de acero con alto contenido de cobre, u otros caeros especiales. Para evitar la formación de óxido durante las paradas, es procedimiento bastante común en las refinerías el dejar las superficies calóricas con la capa de jarabe de azúcar que queda si no se aplica vapor de barrido después de la última templa. El barrido (que frecuentemente se sustituye por una ebullición con agua se hace precisamente antes de recomenzar el trabajo.

1.5.2.5 Tipos de Tachos

En general, predominando tipos de tachos: los de serpentín, que trabajan satisfactoriamente con vapor directo y los de calandria, que trabajan con vapor de escape a baja presión o con vapores extraídos del primer cuerpo de un múltiple efecto, o de un pre-evaporador. Desde hace algunas décadas ha sido introducido en la industria azucarera un nuevo tipo de tacho: el tacho continuo.

Los tachos de calandria de diseño moderno son muchos más rápidos que los de serpentín, y trabajan mejor. En el Hemisferio Occidental, hace muchos años que nos e fabrican Tachos de Serpentín para ingenios azucareros, y en la actualidad muchas personas los consideran anacrónicos.

Tachos de serpentín.

Los Tachos de serpentín son evaporadores verticales de simple efecto operados al vacío. Su superficie calórica se compone de 6 ó 7 serpentines de cobre a los cuales

se admite vapor de 50 a 90 lbs. (3,5 – 3,6 kg/cm²) de presión. Estos serpentines son independientes, y se suelen construir de tubería de cobre de 4 pulgadas de diámetro, enrollada en forma de espiral cónica alto en la periferia exterior y bajo en el centro, con lo que se ajusta a la forma del fondo del tacho y permite un buen drenaje del vapor condensado. Los serpentines se apoyan y fijan sobre unos soportes, con piezas apropiadas en forma de silletas para que el cobre no sea dañado por la vibración, expansión y contracción. La desventaja del tacho de serpentín es que restringe la economía de vapor que se puede lograr, ya que tiene que trabajar con vapor directo. Este equipo fue utilizado hace años en la industria azucarera cubana, actualmente está en desuso.

Tachos de calandria

Un tacho de calandria es un evaporador de simple efecto, de diseño especial, dotado de tubos cortos de gran diámetro y un tubo central grande, para facilitar la circulación de la masa cocida pesada y viscosa que se elabora en cochuras llamadas templeas. Es el tipo de equipo tipificado en la industria azucarera cubana.

EL jarabe y las melazas, en ciertas proporciones, desarrollan cristales de azúcar. Se comienza por la cobertura de la superficie calórica a un nivel apenas suficiente para lograr que haya circulación, y se termina con la carga completa que constituye la templea, cuyo volumen es el triple del volumen con que se comienza.

1. **Fondos:** El fondo tiene forma cónica, con la válvula de descarga situada en el centro. El ángulo que forman los lados con la horizontal no debe ser menor de 20°. Entre el cono y la calandria, que está colocada inmediatamente arriba, debe haber una sección cilíndrica corta, de no menos de 8 pulgadas de altura, que permita espacio suficiente para hacer la fijación de los tubos mediante expansión de sus extremos.
2. **Alimentación:** Si el tacho está provisto de circulación mecánica, la alimentación tiene que llegar hasta la válvula de descarga o cerca de esta válvula, para que sea proyectada hacia el centro, debajo del impelente.

Si el tacho no tiene circulador, hay que poner cuidado especial en el logro de una distribución uniforme en el fondo, debajo de la calandria y lejos del tubo central. Un

método satisfactorio de lograr esto es el que describimos a continuación. La alimentación entra en el tacho por encima de la calandria, y la tubería de alimentación penetra en el tacho hasta el centro del tubo central, donde hay un codo y una tubería vertical que llevan la boca hasta más debajo de la placa inferior. La tubería termina en conexión con la salida lateral de una cruceta. Las cuatro ramas horizontales de la cruceta tienen la mitad del diámetro de la tubería de alimentación, y se apoyan en abrazaderas soldadas a la parte inferior del tubo central.

Los brazos llegan casi al envolvente, y sus extremos se cierran. Cada brazo tiene cuatro huecos de diámetro igual a la mitad del diámetro del brazo, situados del mismo lado, y dispuestos en forma tal que impartirán una rotación en el mismo sentido que las manecillas del reloj a la cocida en el fondo del tacho. Se logra una mejora considerable si se inyecta vapor de escape a la tubería de alimentación, entre la válvula de control de alimentación y el tacho; esta instalación constituye una adaptación de la asperjadora con la alimentación se deja siempre abierta, pero no tanto que interfiera con la alimentación del tacho. Cuando se cierra la alimentación para hacer la concentración final de la templa, la válvula de vapor se deja abierta, y no se cierra más que cuando la templa está terminada. Cuando el tacho se vacía, la limpieza a vapor del fondo escoba puede ser auxiliada por esta conexión.

Tachos continuos

Esta tecnología surge en la segunda mitad del siglo pasado, utilizado primeramente en la fabricación de azúcar de remolacha y en la actualidad para la tecnología de azúcar de caña. Son equipos eficientes, robustos, con alto grado de automatización, minimizando los errores causados por la mano del hombre. Desde el punto de vista energético son eficientes al tener un consumo estable de vapor, se elimina la formación de falsos cristales por lo que no son necesarios los lavados con agua. En Cuba no existe experiencia con esta tecnología. En Cuba no existe experiencia con esta tecnología.

Ventajas de los tachos continuos

- Cocimiento automático.
- Control del Brix de descarga.
- Estabilidad en la producción, granulometría y respetabilidad de la operación.

- Reducción de pérdidas(<http://sertrol.com>).
- No requieren agua de movimiento
- Uso de vapor de calentamiento de baja presión
- Agitadores mejoran circulación de la masa
- Nivel de trabajo ligeramente por encima de la calandria(CASSA, 2017)

1.6 Otros equipos vinculados con el vapor en la industria

1.6.1 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.

1.6.1.1 Función de un generador de vapor

El generador de vapor tiene la función de transferir al agua la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión de sustancias combustibles, para que ésta se convierta en vapor. Este equipo tuvo su origen con el surgimiento de las máquinas de vapor en la época de la revolución industrial (<https://www.ecured.cu>, 2019).

1.6.1.2 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 °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(A.RUBIO, 2000).

1.6.1.3 Funcionamiento del generador de vapor

El agua se impulsa al generador de vapor mediante la bomba de alimentación, la que la hace circular de forma forzada por el economizador; éste es un equipo formado por bancadas de tubos interconectados mediante colectores o cabezales, por dentro de los tubos circula el agua y por fuera los gases calientes. La función del economizador es calentar el agua, generalmente hasta una temperatura inferior a la de saturación correspondiente a la presión a la que se encuentra el agua; esto se hace con el objetivo de que el agua no entre fría al domo y evitar contracciones que pueden provocar rotura. El agua entra al domo después de salir del economizador; en él se produce la separación del vapor y el agua, el agua que entra al domo sale de éste por los tubos llamados descendentes que alimentan los colectores inferiores de las paredes de agua; éstos son tubos que cubren la mayor parte de la superficie interior del horno, por los tubos circula el agua y por y por fuera están los gases calientes y las llamas, éstas transfieren a los tubos una gran cantidad de calor por radiación y por convección; se forma entonces en el interior del de los tubos una mezcla de vapor y agua que asciende por la pared de tubos producto a la disminución de su densidad. Las paredes de agua tienen colectores en su parte superior, a través de los cuales se descarga la mezcla agua-vapor al domo. En el domo, el vapor se separa del agua acumulándose en la parte superior de donde es extraído para ir a los sobrecalentadores, los sobrecalentadores de vapor tienen la función de hacer que el vapor adquiera una temperatura superior a la de saturación, correspondiente a la presión a que se encuentran, para que salga del generador con

mayor entalpía. El agua que no pasó a vapor va de nuevo a los tubos descendentes y se repite el ciclo(<https://www.ecured.cu>).

1.6.2 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 partes fundamentales una es el estator que como su nombre lo indica es un elemento estático o fijo(A.PONZ, 1887). 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.

1.6.2.1 Turbinas de Contrapresión

El vapor saturado que sale del tambor de la caldera es sobre calentado para aumentar la energía del vapor antes de entrar a la turbina. En las turbinas a contrapresión el vapor sobre calentado entra a la zona de alta presión de la turbina. A medida que el vapor pasa a través de las aspas de la turbina, el vapor va perdiendo calor, energía y presión. En las zonas de baja presión, se empieza a formar humedad (condensado temprano), a menudo variando de **0,1 – 0,5 %** de humedad.

El vapor ahora saturado puede salir de la turbina a 1.5 bar y tiene a lo largo de la longitud del paso de vapor de la turbina, muchas extracciones de vapor separadas e individuales. Cada extracción ofrecerá vapor a varias presiones para usos que van desde la generación de energía, calentamiento de procesos, calentamiento de distritos, desalinación, desaireación, calentamiento, etc. En las turbinas a

contrapresión, debido a los metales de construcción la existencia de agua o altos niveles de humedad deben ser evitados. (Un desempeño correcto logrado con una concentración de ácidos orgánicos en vapor de 2 – 4 ppm). La protección del metal expuesto al condensado temprano es crítica para garantizar la confiabilidad de la planta en su zona de "fase de transición" de la turbina donde los contaminantes pueden concentrarse desde 100 – 250 veces más que en seno del vapor suministrado.

La pureza correcta del vapor podrá prevenir la formación de depósitos, la corrosión y asegurará una expectativa de vida máxima. Las pruebas analíticas de rutina de muestras de vapor saturado y sobrecalentado deberían formar parte integral del control del programa de tratamiento de agua.

La protección y corrosión del metal en la turbina a contrapresión y las extracciones generalmente solo ocurre cuando se expone a algún grado de saturación, humedad o líquido (electrolito). Durante el paso del vapor sobrecalentado a través de la turbina y con su pérdida de energía, se produce vapor saturado y condensado temprano. Las reglas son similares a las de controlar el fuego, si retira una o más variables que crean la corrosión, el mecanismo de corrosión puede ser eliminado o controlado.

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(FERNÁNDEZ, 2003).

1.6.2.2 Turbinas de Condensado

El vapor saturado que sale del tambor de la caldera es enviado a una turbina de condensado, a menudo utilizada para generación de energía auxiliar. El vapor que sale de la turbina a menudo se enfría rápidamente en un condensador con agua de enfriamiento a través de una carcasa de varios pasos (lado de agua de enfriamiento) y una superficie de tubos (lado de vapor). La pureza del vapor a la turbina todavía es crítica. Ya que el condensador se enfría a menudo con agua de enfriamiento, el desempeño del tratamiento químico del agua de enfriamiento también es crítico para lograr el éxito.

El enfriar rápidamente el vapor para formar condensado (típicamente temperatura entre 40 y 50 °C (100 – 120 °F) crea un vacío que ayuda en la operación de la turbina y en la eficiencia. Al aumentar la temperatura del condensado (debido a un bajo rendimiento del enfriamiento/ formación de depósitos en el lado del enfriamiento) se disminuye el vacío lo que a su vez regresa presión a la turbina disminuyendo así el desempeño de la turbina. La operación ineficiente de la bomba de vacío y la remoción ineficiente del oxígeno del haz de tubos en el condensador aumenta las posibilidades de corrosión(FERNÁNDEZ, 2003).

1.7 Productos químicos empleados

En la industria azucarera los productos químicos son utilizados principalmente para la limpieza y desinfección, tal es el caso de del hidróxido de sodio (sosa caustica) y el ácido clorhídrico. Dos productos muy utilizados principalmente en la limpieza de evaporadores y tachos.

Los efectos que producen los productos químicos en algunos casos son conocidos, pero en otros se sabe poco sobre su acción en los humanos y el medioambiente a largo plazo. Por ejemplo, el cáncer originado por un producto químico puede en algunos casos tardar de 15 a 40 años en manifestarse(<http://www.ocu.com>) .

Por lo general, para sustancias comerciales establecidas existen bases de datos con sus propiedades tanto fisicoquímicas como toxicológicas lo que ha permitido clasificar muchas sustancias químicas y preparaciones según el tipo y grado del peligro.

Esta clasificación es una primordial fuente de conocimiento sobre el peligro y se encuentra en las etiquetas de los productos, en las hojas de datos técnicos, información proporcionada por las asociaciones gubernamentales y comerciales e información adicional disponible en la bibliografía técnica.

El efecto sobre la salud está dado por las propiedades tóxicas que tienen las sustancias: irritante o corrosiva, fibrógena, alérgica, dermatítica, carcinogénica, venenosa y asfixiante; las afectaciones se provocan en cualquier parte del

organismo, pues se inhalan, absorben o ingieren a través de los pulmones, la piel y la boca respectivamente. El uso de equipos de protección personal minimiza su incidencia.

Los cambios tecnológicos que conlleven una reducción de los productos químicos empleados en el proceso constituyen medidas de producción más limpia y propician procesos más amigables con el medio ambiente.

1.8 Conclusiones parciales

1. El proceso de fabricación de azúcar en Cuba sigue los métodos tradicionales, precisando de avances tecnológicos en muchas de sus áreas.
2. Para poder aumentar los índices actuales de eficiencia fabril en la industria azucarera cubana es necesario efectuar cambios tecnológicos que permitan aprovechar las amplias potencialidades de los recursos energéticos.
3. La tecnología mundial en producción de azúcar ha intensificado el uso de los portadores energéticos con la utilización de evaporadores de película y tachos continuos.

Capítulo 2. Descripción del proceso y la tecnología instalada.

2.1 Caracterización general de la fábrica

El central azucarero George Washington está ubicado en la porción oeste de la provincia Villa Clara. La capacidad de molienda asciende a 4 600 t caña / día y su rendimiento industrial en la zafra 2003 fue de 11.52 t azúcar / 100 t caña. Además tiene una refinería para 320 t azúcar refino / día, con producción de refinados para el mercado interno en divisas y algunas exportaciones. A partir del 2002 la obtención del azúcar crudo se realiza por el esquema de doble semilla con disolución parcial del azúcar B y en el año 2003 comienza la extracción de mieles con purezas superiores a 50% e inferiores a 58% (Miel B), denominándose "sistema de dos masas y media". La refinería a partir de marzo de 2003 introduce un sistema de cristalización con una sola masa, eliminando el anterior sistema de 4 masas con cristalización independiente.

Actualmente solo en la entidad se produce azúcar refino, el proceso de fabricación de azúcar crudo, inactivo desde hace varios años se prevé su remodelación y puesta en funcionamiento, esto además de revitalizar la industria con la consiguiente competitividad tecnológica es una premisa básica para la instalación de una bioeléctrica. Los datos, balances, esquemas de proceso que se emplearan en este trabajo han sido suministrados por el departamento técnico de la industria, en especial el MSc Ing. Liván Carlos Hernández Días.

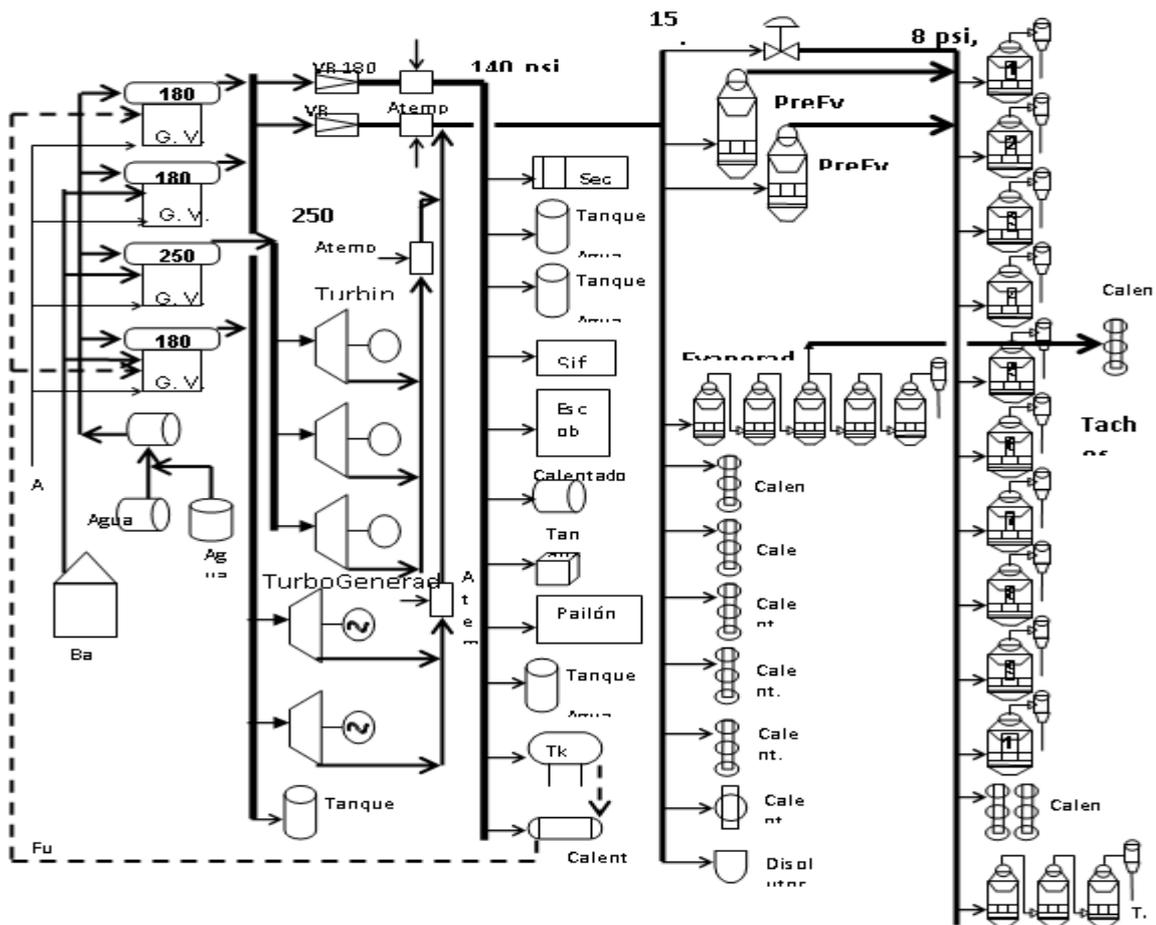
Diagnósticos energéticos realizados en la entidad durante los últimos años de operación reflejan una serie de deficiencias, entre ellas:

- Frecuentes paradas afectan la estabilidad del proceso tecnológico y cogenerativo.
- Tandem de molinos con ineficiencias, humedad del bagazo entre 48 y 54 %, la turbina de los molinos 4 y 5 presenta oscilaciones constantes de su velocidad.

- Se solucionan los picos en la demanda energética o paradas del central con la quema de combustibles fósiles.
- No se limpian las superficies exteriores de las calderas (Sopleteo).
- El sistema de almacenamiento y retroalimentación de bagazo es deficiente.
- Se realizan operaciones indebidas en la estación de tachos de crudo.
- Ambiente cargado de partículas de bagazo, ceniza y polvo.
- Mal estado del aislamiento térmico de los equipos y las redes de vapor, agua y fluidos del proceso.
- Deficiente recolección y clasificación de los condensados.
- Escapes importantes de vapores a la atmósfera.

A continuación, se presenta la figura 8 mostrando el esquema energético empleado en la UEB durante los últimos años que se fabricó azúcar crudo. En la tabla 1 se reportan los principales parámetros operacionales de la industria.

Figura 8 esquema energético empleado en la UEB durante los últimos años que se fabricó:



.Figura 8: Esquema energético del vapor de la fábrica

Fuente: MSc Ing. Liván Carlos Hernández Días. Gestión energética en la fábrica de azúcar crudo y refino "George Washington". Tesis para Optar por el Grado de Master en Análisis de Procesos en la Industria Química.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros operacionales de la industria en los últimos años que se fabricó azúcar crudo.

Tabla 1: Parámetros Operacionales de la industria

Parámetro/Variable	UM	Valor	Parámetro/Variable	UM	Valor
Flujo caña	t/h	190.63	Flujo azúcar a refinería	t/h	15.57
Composición fibra en caña	%	17.34	Concentración sirope off	°Bx	74
Humedad bagazo	%	49.27	Concentración licor crudo	°Bx	63.6

Concentración jugo mezclado	°Bx	16.0	Temperatura licor crudo	°C	65.4
Concentración jugo claro	°Bx	16.12	Temperatura licor tratado	°C	84.4
Concentración meladura	°Bx	59.55	Concentración licor filtrado	°Bx	54.01
Concentración mieles A y B	°Bx	73 – 75.5	Concent. licor concentrado	°Bx	64.03
Concentración miel final	°Bx	88.5	Concent. masas refino	°Bx	88.6
Presión vapor d., L-250 psig	ata	15.91	Concent. sirope de masas refino	°Bx	74
Presión vapor d., L-180 psig	ata	13.13	Temperatura aire secador	°C	84
Temp. vapor d., L-250 psig	°C	307	Presión vapor d. reducido,L-140	ata	8.46
Temp. vapor d., L-180 psig	°C	298.1	Temp. Vapor d. reducido,L-140	°C	249.4
Presión vapor escape, L-15 psig	ata	2.12	Temp. Vapor escape, L-15 psig	°C	130
Presión vapor preevap., L-8 psig	ata	1.56	Potencia generada	kW	4,788.9

Fuente: MSc Ing. Liván Carlos Hernández Días. Gestión energética en la fábrica de azúcar crudo y refino “George Washington”. Tesis para Optar por el Grado de Master en Análisis de Procesos en la Industria Química.

2.2 Descripción del proceso de azúcar refino en la UEB George Washington

En el ingenio George Washington se produce azúcar refino a partir del azúcar crudo como materia prima principal de proceso.

Comienza con una etapa de Afinación donde el azúcar crudo se mezcla inicialmente con agua para remover la película de miel de baja pureza que contienen los

cristales, posteriormente en las centrifugas son separados y el azúcar es lavado con agua caliente a 80 °C, obteniéndose azúcar afinado. A la miel de afinación se le extrae el 8 % de azúcar crudo y se recircula al mezclado inicial. En esta etapa debe removerse entre el 40 – 55 % del color inicial del azúcar.

El azúcar crudo afinado se pre-disuelve con agua caliente obteniéndose un licor pre-disuelto de 62-68 °Bx pasando a un disolutor el que rectifica el Brix de 60-65 calentándolo hasta 63 °C. El que es colado a través de un colador parabólico que entrega licor libre de sólidos en suspensión.

En el primer tratamiento químico se le añade ácido fosfórico y lechada de cal al licor crudo, para obtener flóculos que en la etapa de clarificación arrastren las impurezas en suspensión y remuevan parte, también por combinaciones químicas.

Se adiciona además decolorante catiónico y peróxido de hidrogeno de 0.65 l/min entre ambos y se le inyecta aire comprimido para lograr la emulsión del aire en el licor.

La formación de los flóculos de fosfato tricálcico debe oscilar con un PH entre 6.8 y 7.2, para ello el ácido fosfórico se adiciona diluido al 7 % para buscar así una mejor distribución del ácido a una razón de dosificación de 350-500 ppm en base a sólidos disueltos, su dosificación depende de la calidad de crudo derretido. La lechada de cal debe tener una densidad de 2 a 3 °Baume y la cantidad a dosificar será la necesaria hasta obtener pH ligeramente neutro entre 6.8-7.2 u otro indicado por el departamento de fabricación, esta operación se realiza de forma automática generalmente. Para la operación continua del primer tratamiento y clarificación se debe alimentar licor crudo a razón de 20 m³/h con una densidad de 60-65 °Bx y 63 °C, para lograr el tiempo de contacto necesario del licor con los productos químicos, la formación de los flóculos de fosfato tricálcico y favorecer la estabilidad de la clarificación.

La clarificación se efectúa en un Clarificador CLARIN DYN. A este equipo llega el licor tratado y aereado, al que se le adiciona una solución de un agente floculante que facilita la formación de flóculos, este licor a la densidad requerida y con las burbujas de aire ocluidas en su interior, permiten que los flóculos y las impurezas asciendan a la superficie del clarificador, lugar desde el cual son eliminados de

forma continua por medio de descachazadores mecánicos (raspillas) y manteniendo como mínimo unos 25 mm de espesor para evitar la pérdida de temperatura del clarificador. La cachaza debe ser lo más compacta posible para disminuir al máximo las pérdidas de sacarosa.

La cachaza, en período inactivo es agotada en la planta de tratamiento de cachaza, enviándose el agua dulce para su respectivo tanque y el residuo sólido se desecha cuando su contenido de Pol es inferior al 4 % y en zafra la cachaza es enviada al tanque de jugo turbio de los filtros de crudo.

El resultado de la clarificación debe ser un licor claro y brillante libre de sólidos en suspensión.

El licor clarificado es tratado con carbón vegetal activado para su decoloración a valores de 1.50 Horne. El consumo de carbón oscila entre 3 – 4 Kg/Tm Az. Refino.

Para la separación de los sólidos en suspensión y el carbón vegetal activado se utilizan 9 filtros Suchar (se está en puesta en marcha 3 filtros prensas Chinos nuevos de 125 m² para la primera filtración) a presión distribuidos en dos secciones, la primera del 1 al 6, con dos baterías de 4 y 2 filtros para primera filtración con su tanque, teniendo 4 combinaciones para filtrar la descarga de los filtros que va para un tanque con movimiento y la segunda sección de 3 filtros para una segunda filtración (rectificación de seguridad) con su tanque de licor filtrado, Los filtros cuentan con tuberías de agua, pre-capa y licor tratado con carbón. En la salida posee liras para observar la calidad del licor y para controlar la presión de trabajo cuentan con manómetros de 0 a 100 lbs/pulg².

Para la preparación de la pre-capa se cuenta con 3 tanques, en qué, 2 de ellos se emplean en la primera filtración y el tercero en la segunda. Estos tanques están equipados con agitación mecánica para mantener en suspensión la mezcla de licor con tierra filtrante, empleando entre 20 y 27 Kg. de tierra por filtro Suchar y 81 kg para los Filtros prensas.

La densidad del licor procedente de los filtros varía entre 54 – 60 °Bx, haciéndose necesaria su concentración a valores de 65 – 71 °Bx antes de su cocción en tachos.

Para esta operación se utiliza un evaporador de triple efecto disminuyendo así el consumo de vapor.

La elaboración de las masas cocidas se efectúa en tres tachos tipo Low Heat con un esquema de doble masa única (Doble "Back Boiling") con cristalización para dos "pies" de templeas, operándose con 2 ciclos de templeas masa única (pie de templea con licor y alimentación con sirope de la templea anterior)

El sirope llega dentro del ciclo a un valor de color alto en el cual se envía a los tachos de crudo para recuperar sacarosa como azúcar crudo.

Se utilizan 2 centrifugas automáticas discontinuas de 1500 kg/carga, para la separación de los cristales y siropes, el lavado de los azúcares se realiza con agua de condensado caliente procedente de los tachos de refinado, libre de contaminaciones bacteriológicas, filtrada y sin color.

Debido a que se producen dos colores de azúcares del ciclo alto y ciclo bajo, con diferentes calidades, para garantizar un flujo de azúcar uniforme se requiere la mezcla proporcional de los mismos. Para ello contamos con 5 cajas en que se deposita el azúcar húmedo por color y posteriormente se realiza el mezclado para obtener color uniforme.

El azúcar ya mezclado contiene una humedad entre 0.7 - 1.2 % con la cual no es posible su almacenamiento y conservación posterior. Para la eliminación de esta humedad se utiliza un secador Yugoslavo de 600 T/Día de capacidad, del que se obtiene un azúcar con 0.06 % máximo.

El medio utilizado para el secado es aire, calentado mediante estufas de vapor a temperaturas de 80 – 95 °C, máximo 100 °C y aire frío para que la temperatura de salida en el azúcar sea inferior a 38 °C.

Después de secado el azúcar, es pesado y envasado en sacos de polipropileno de 50 kg.

2.3 Descripción de Sistema Termoenergético

El sistema termoenergético está formado básicamente por los bloques de generación de vapor, fuerza y consumo. El esquema termoenergético de la fábrica se muestra en el anexo3.

Bloque de Generación de Vapor: formado por 4 generadores de vapor (GV) Retal con un caudal máximo de 45 t/h cada uno, utilizando bagazo como combustible principal y fuel oil como un combustible opcional en dos de ellos (GV #1 y 4), tres diseñados para una presión de 18.01 ata y 320 °C (GV #2, 3 y 4) y uno para una presión de 13.25 ata y 320 °C (GV #1), con control operacional parcialmente automatizado. Además de sistemas de tratamiento de agua, alimentación de agua, sistema de almacenamiento y retroalimentación de bagazo y sistema de alimentación y calentamiento de fuel oil.

Bloque de Fuerza: formado por el tándem y la planta eléctrica.

Tándem.

- 1 turbina Skoda del 1988 de potencia 368 kW (500 hp), 11.21 ata (150 psig) y 240 °C, con modificaciones para operar a 18 ata, para el movimiento de la desmenuzadora.
- 1 turbina Skoda del 1987 de potencia 1269 kW (1725 hp), y 18.01 ata (250 psig) y 315 °C, para el movimiento de los molinos 1, 2 y 3.
- 1 turbina Skoda del 1988 de potencia 1030 kW (1400 hp), 11.21 ata (150 psig) y 240 °C, con modificaciones para operar a 18 ata, para el movimiento de los molinos 4 y 5.

Planta Eléctrica.

- 2 turbogeneradores alemanes EKM VEB del 1968 con potencia de diseño 1500 kW y vapor a 10.52 ata (140 psig) y 186 °C, con adaptaciones para operar a 18 ata y 310 °C y generar 3 MW, generadores de fabricación China de 3 MW cada uno a 6300 V.
- 1 turbogenerador alemán EKM VEB del 1967 con potencia de 1000 kW y vapor de 10.52 ata (140 psig) y 186 °C, parado por más de 5 años.

Paralelamente opera una estación de reductora-atemperadora de directo a una línea de vapor directo reducido de 8 - 10 ata para satisfacer las necesidades de limpieza, escobas, calentamiento del tanque de fuel oil, calentador de fuel oil, calentamiento de agua para centrifugación y calentamiento del secador de azúcar refino.

Bloque de Consumo: está formado por las superficies de intercambio de calor de los equipos tecnológicos que conforman el proceso de fabricación de azúcar crudo y de refinación.

Se alimenta el vapor de escape procedente de los turbogeneradores y las turbinas una vez atemperado a:

- 2 preevaporadores en paralelo con un área de transferencia de 1790 y 700 m², que entregan vapor “vegetal” a los 7 tachos de crudo, 3 tachos de refino, concentrador de licor en triple efecto (683.3 m² s.c.) y calentador secundario de jugo mezclado (129 m² s.c.).
- 1 quíntuple efecto con un área de 3046 m² (otro de reserva para limpieza con 2470 m²) con extracción de vapor en el 3er vaso a calentador primario de jugo mezclado (129 m²).
- 1 calentador rectificador de jugo mezclado (129 m²), 1 calentador de jugo clarificado (129 m²), 1 calentador de licor de tratado (38.2 m²), 1 calentador de miel de afinación (13.35 m²), 1 calentador de la suspensión de carbón activado (12.6 m²) y disolutor de azúcar.

El sistema de evaporación de jugo, los tachos de crudo y refino y el concentrador de licor evacúan la evaporación final hacia condensadores individuales en cascada a contracorriente a los cuales se les suministra y evacua agua por un sistema general de inyección, rechazo y enfriamiento, manteniéndose el vacío mediante un sistema general de vacío formado por bombas Nash de sello líquido.

Sistema de recolección de condensados:

Condensados puros para alimentación de las calderas y provienen de la condensación en los preevaporadores y los calentadores de jugo clarificado y mezclado alimentados con vapor de escape, con alternativas de incluir los condensados de los vasos 1 y 2 del quíntuple efecto, y de los tachos. La diferencia entre los condensados recolectados y la necesidad en calderas es suplida por una planta de tratamiento de agua.

Condensados contaminados para uso en la imbibición y otros usos del proceso tecnológico, provienen de la condensación de los vapores vegetales producidos en

los preevaporadores utilizados en los tachos, concentradores de licor, calentadores y los condensados del quíntuple efecto con alternativas de pasar al tanque de condensados puros cualesquiera de ellos según sea su calidad.

2.4 Bases de datos utilizadas

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron como referencia fundamentales los datos reportados por la UEB “George Washington”, además se utilizaron los trabajos Gestión energética en la fábrica de azúcar crudo y refino “George Washington” de la tesis para optar por el grado de máster en análisis de Procesos en la Industria Química del Ing. Liván Carlos Hernández Díaz (Hernández Díaz, 2004) y el trabajo de producción de Rocío Fernández Leiva e Ivis Caridad Pérez Torres titulado Análisis de la Gestión Energética, Seguridad y Riesgos del proceso de Azúcar Refino en el central George Washington (Torres, 2019). A continuación, se muestran tablas con los resultados de estos trabajos y que son básicos para el análisis a realizar.

2.5 Balances realizados en el proceso de producción de azúcar crudo

2.5.1 Balance de masa en el proceso de producción de azúcar crudo

Durante los últimos años esta etapa del proceso no ha trabajado, para los cálculos y análisis se emplearán datos correspondientes a la zafra 2003-2004. Para ello se tomaron los principales parámetros del proceso para realizar un balance de masa y obtener los valores de las corrientes del proceso de la azúcar.

Principales balances de masa utilizados en las etapas de extracción de azúcar crudo.

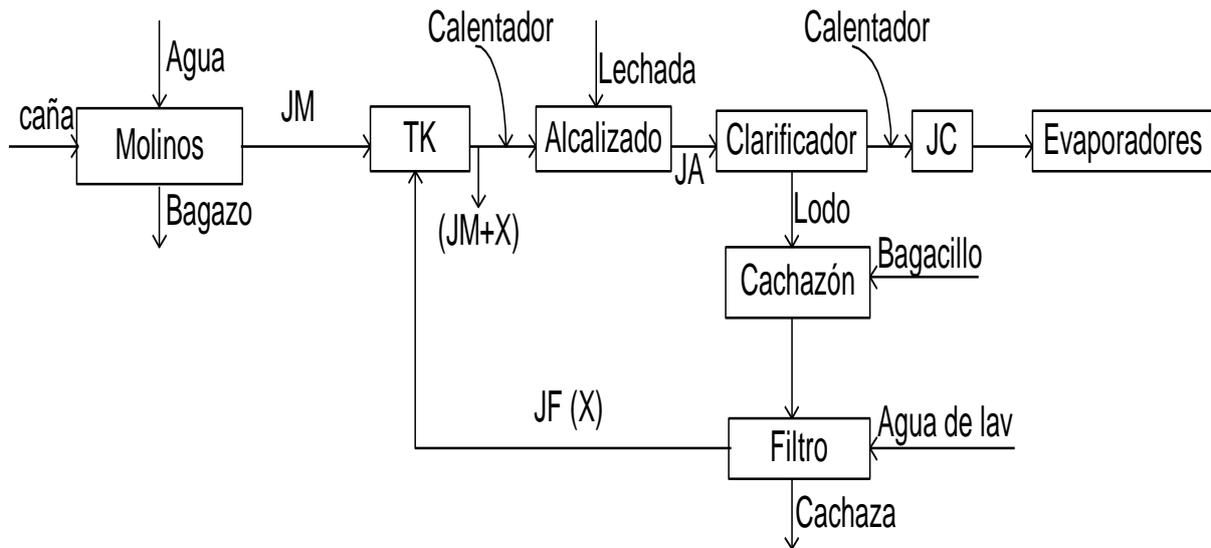


Figura 9: Etapas de extracción de azúcar crudo.

MasadeJmezclado total

$$= (\text{masadecaña} * \% \text{ extracción de Jmezclado}) * 1.15$$

$$\text{Masa de Jfiltro} = 0.15 * \text{MasadeJmezclado total}$$

$$\text{MasadeJclarificado} = 0.85 * \text{MasadeJmezclado total}$$

$$\text{MasadeJclarificado} * (Bx) = \text{Masa Meladura} * (Bx)$$

Tabla 2: Valores promedio de los balances de masa del proceso de azúcar crudo.

Balance de masa	t/h
Masa de caña	191.66
Masa de Jmezclado	220.41
Masa de Jfiltro	33.06
Masa de Jclarificado	187.35
Meladura	46.12

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Balance de energía en el proceso de producción de azúcar crudo

El balance de energía se realiza en los equipos grandes consumidores de vapor, tales como los preevaporadores, los evaporadores, los calentadores y los tachos. Se calcula el consumo de vapor de escape de cada uno de estos equipos. A continuación, se muestran tablas con los resultados promedios en los equipos industriales (Hernández Díaz, 2004).

Tabla 3: Balance de energía de los equipos consumidores de vapor.

Balance de energía	t/h
Pre evaporadores	65.41
Evaporadores	40.24
Calentadores	28.3
Tachos	33.4

Fuente: Hernández Díaz Liván C. Gestión energética en la fábrica de azúcar crudo y refino "George Washington". Tesis para Optar por el Grado de Master en Análisis de Procesos en la Industria Química.

2.6 Índices fundamentales de consumo de vapor en la producción de azúcar crudo

Se determinaron los índices de consumo de vapor por tonelada de caña molida ($t_{\text{vapor}}/t_{\text{caña}}$) en los principales equipos consumidores de vapor en la industria.

$$\text{índice de consumo} = \text{consumo de vapor} / \text{caña molida}$$

Tabla 4: Índices de consumo.

índice de consumo	$t_{\text{vapor}}/t_{\text{caña}}$
Pre evaporadores	0.343
Evaporadores	0.21
Calentadores	0.057

Tachos

0.175

Fuente: Elaboración propia.

2.7 Balances realizados en el proceso de producción de azúcar refinado

Balance de masa en la Refinería.

Se trabaja con datos de producción de azúcar refinado de los años 2018-2019(Torres, 2019).

Afinación:

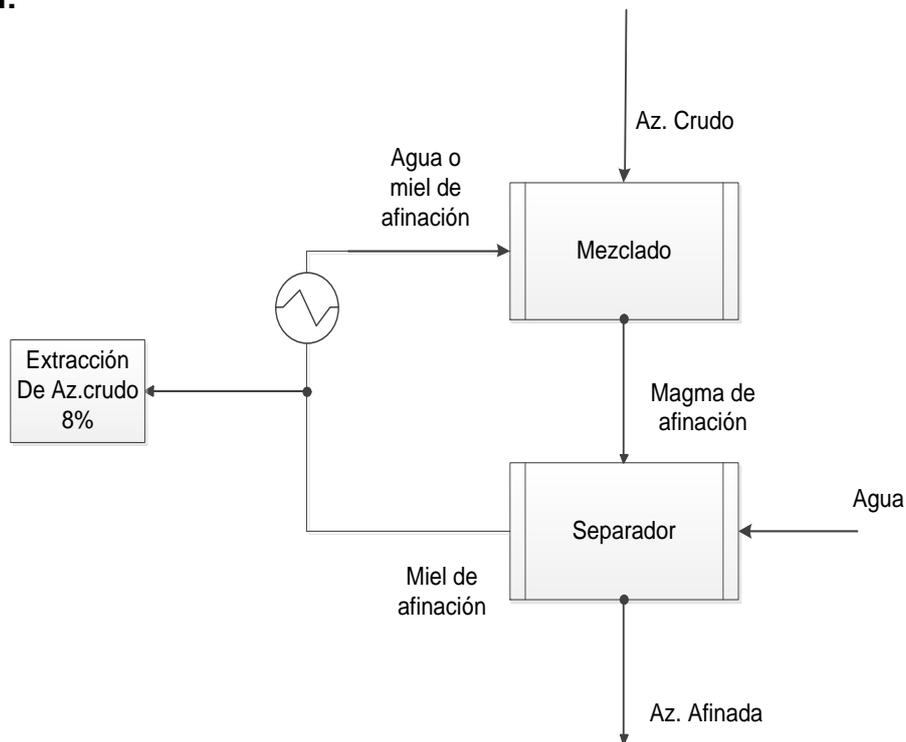


Figura 10: Etapa de afinación.

Balance de masa:

Balance total

$$M_{\text{agua de arranque}} + M_{\text{az. crudo}} = M_{\text{magma}}$$

Balance parcial

$$M_{\text{az. crudo}} * X_{\text{az. crudo}} = M_{\text{magma}} * X_{\text{magma}}$$

Balance total

$$M_{magma} + M_{agua} = M_{az. \text{ afinada}} + M_{az. \text{ afinada}}$$

Balance parcial

$$M_{magma} * X_{magma} = M_{az. \text{ afinada}} * X_{az. \text{ afinada}} + M_{miel \text{ afin}} * X_{miel \text{ afin}}$$

Balance de energía

$$Q_g + Q_c = 0$$

$$Q_g = M_{miel \text{ recirc}} * \Delta T * C_p$$

$$M_{vapor} = Q_c / \lambda$$

Disolución:

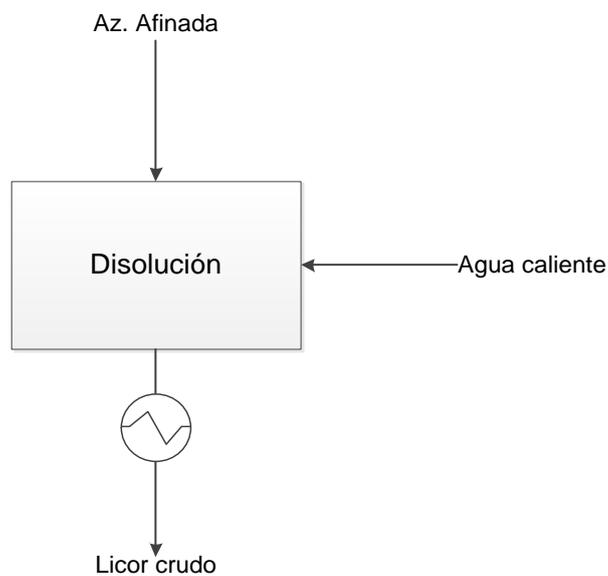


Figura 11: Etapa de disolución.

Balance de masa:

$$M_{az. \text{ afinada}} + M_{agua} = M_{licor \text{ crudo}}$$

Balance de energía:

$$Qg + Qc = 0$$

$$Qg = M_{licor\ crudo} * \Delta T * C_p$$

$$M_{vapor} = Qc / \lambda$$

Primer tratamiento químico:

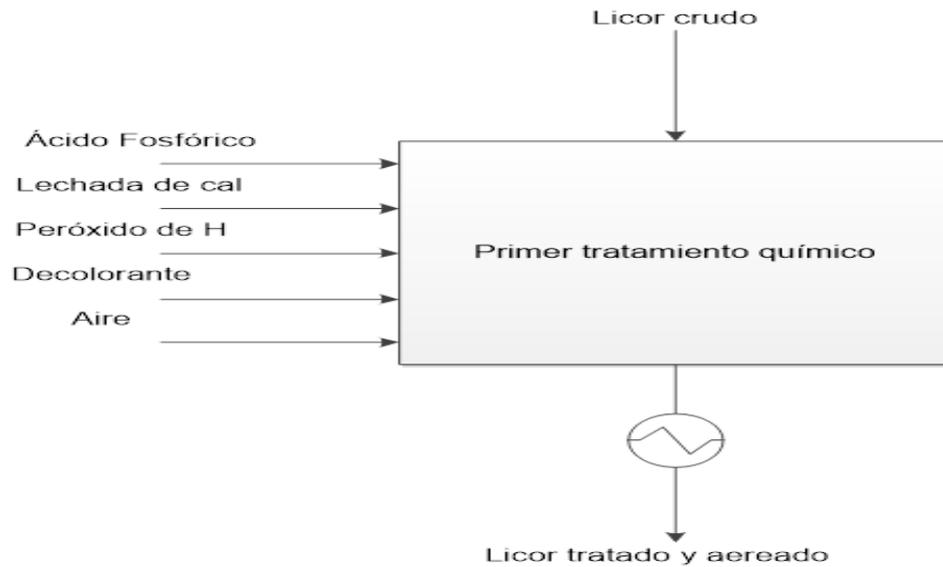


Figura 12: Etapa de primer tratamiento químico.

Balance de masa

$$M_{l.\ crudo} + M_{acidfosf} + M_{lech\ cal} + M_{perox\ H} + M_{decol} + M_{aire} = M_{Ltratad\ aer}$$

Balance de energía

$$Qg + Qc = 0$$

$$Qg = M_{L\ tratad\ y\ aireado} * \Delta T * C_p$$

$$M_{vapor} = Qc / \lambda$$

Evaporación

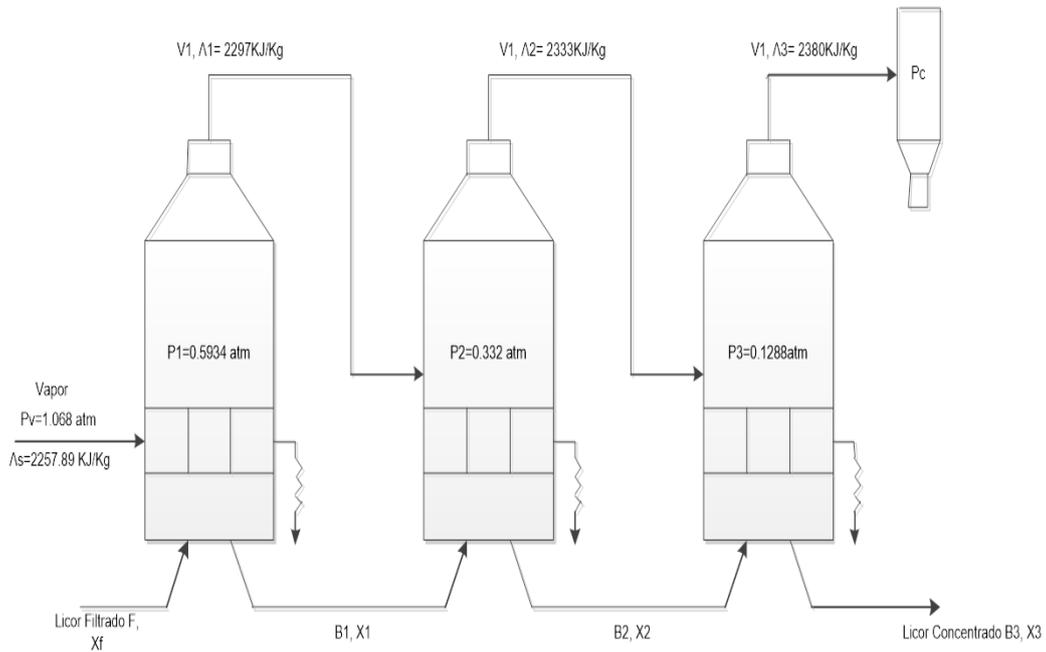


Figura 13: Etapa de evaporación.

Balance de masa

$$F = B3 + Vt$$

Balance de energía

$$F * Xf = B3 * X3$$

$$S = \frac{Vt}{3} * \frac{\lambda_1}{\lambda_s} + \frac{F * Cp * \Delta T}{\lambda_s}$$

$$V1 = \frac{(S * \lambda_s) + F * Cp * (Tf - T1)}{\lambda_1}$$

$$V2 = \frac{(V1 * \lambda_1) + (F - V1) * Cp * (T1 - T2)}{\lambda_2}$$

$$V3 = Vt - V1 - V2$$

Cristalización

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(E.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(R.Espinosa, 1990).

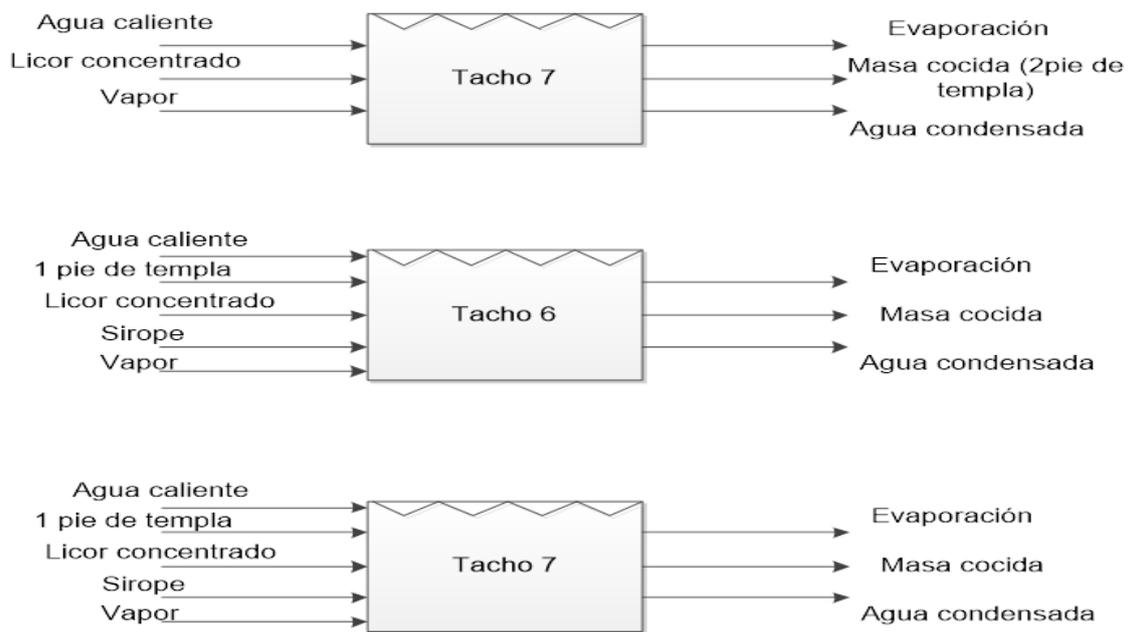


Figura 14: Etapa de cristalización.

Balance de masa en el tacho 7

$$MLconc * XLconc = Mmasa cocida * Xmasa cocida$$

Balance de energía

$$Qg + Qc = 0$$

$$Qg = ML conc * \Delta T * Cp$$

$$Mvapor = Qc/\lambda$$

Tacho 6

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

$$W_{inc} = P_{inc} * \left(1 - \frac{Bx1}{Bx3}\right)$$

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

$$P_{mat} = (P_{fin} - P_{inc} - W_{inc}) * \frac{Bx2}{Bx3}$$

$$W_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx2}{Bx3}\right)$$

$$Dtacho = \frac{W_{inc} + W_{mat}}{T0} * 3$$

Balance en el tacho 7

Aquí se realiza el mismo procedimiento que en el tacho 6

Tabla 5: Resumen de los balances de masa y energía en la Refinería.

Balance de masa	t/h
Masa de azúcar crudo	1.51
Masa de magma	19.435
Masa miel afinada	2.055
Masa miel recirculación	1.89
Masa de agua	9.685
Masa licor tratado	26.314
Masa del licor concentrado	24.632

Fuente: Elaboración propia

Balance de energía

Tabla 6: Balance de energía

Balance de energía	QG (kj)	Masa vapor (t/h)
Afinación	-101087.068	0.0454
Disolución	-496555.284	0.2233
Primer tratamiento químico	-2145305.26	1.0134
Cristalización	-34055270.54	14.374

Fuente: Análisis de la Gestión Energética, Seguridad y Riesgos del proceso de Azúcar Refino en el central George Washington de Rocío Fernández Leiva e Ivis Caridad Pérez Torres.

2.8 Índices fundamentales de consumo de vapor en la producción de azúcar refino.

Se determinó el índice de consumo de vapor por tonelada de caña molida para conocer las toneladas de vapor consumidas por tonelada de azúcar crudo procesado en la industria.

$$\text{índice de consumo} = \text{consumo de vapor} / \text{masa de azúcar crudo}$$

Tabla 7: Índice de consumo de vapor en evaporadores y tachos.

índice de consumo	t vapor/tcaña
Evaporadores	0.196
Tachos	0.41

Fuente: Elaboración propia

2.9 Conclusiones parciales

- Durante los últimos años de operación del proceso de crudo, se detectaron problemas que afectan la eficiencia energética.
- En la industria existen problemas de salideros de vapor a la atmosfera y falta de aislamiento óptimo de tuberías y equipos que afecta la eficiencia energética.

- El consumo de vapor no es estable, dando como consecuencia picos en su consumo, lo que obliga a una utilización menos eficiente del mismo.
- Hacer más continuo el flujo tecnológico del proceso de producción de azúcar, es una vía para la intensificación del ahorro energético.

Capítulo 3. Análisis de los resultados

Durante el desarrollo de este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos sobre el consumo del vapor consumido en el ingenio. Esto se realiza mediante la comparación de los índices de consumo de vapor obtenidos en la fábrica y los propuestos en la literatura para así conocer si se trabaja en los rangos propuestos.

Además, se proponen medidas para que pueda existir una minimización del consumo de vapor en la industria como son la introducción de evaporadores de película y tachos continuos, y se realiza un análisis económico de estas medidas propuestas.

3.1 Análisis de los resultados

3.1.2 Comparación de los índices de la literatura con los índices determinados

Según la literatura consultada (ESPINOSA, 1984) se establecen índices para el consumo de vapor en los equipos industriales, en la siguiente tabla se reportan los mismos:

Tabla 8: Índices que recomienda la literatura para la industria azucarera con fábricas de azúcar crudo y refino.

Equipo	Índice propuesto por Espinosa R. (tvapor/tcaña)
Calentadores	0.010 - 0.060
Preevaporadores	0.110 - 0.136
Evaporadores	0.150 - 0.350
Tachos	0.200 - 0.350

Fuente: Tabla 9.3. Espinosa R. y col. Sistema de utilización del calor

Se realiza una comparación entre los índices que recomienda la literatura (tabla 8) y los índices de consumo en el proceso de producción de azúcar crudo (tabla 3).

El preevaporador consume una cantidad de 0,343 t vapor/t caña, una cantidad superior a la propuesta en la literatura.

Los evaporadores consumen 0.21 t vapor/t caña, valor en el rango propuesto por la literatura.

Los calentadores y los tachos con un consumo específico de 0.057 y 0.175 t vapor/t caña respectivamente, se encuentran en el rango establecido por la literatura.

Se realiza una comparación entre los índices que recomienda la literatura (tabla 8) y los índices de consumo en el proceso de producción de azúcar crudo tabla 7

Los evaporadores consumen 0.196 t vapor/t caña, valor en el rango propuesto por la literatura.

Los tachos tienen un consumo específico de 0.41 t vapor/t caña, una cantidad superior a la propuesta en la literatura.

Independientemente que algunos índices básicos calculados estén en el rango especificado por la literatura debe tenerse en cuenta que estos textos fueron escritos hace varios años y que en los últimos tiempos la tecnología ha avanzado mucho sobre todo en los referentes a eficiencia energética, uso correcto de portadores y otros elementos novedosos en aras de cumplir acuerdos internacionales referidos al cambio climático. Es por ello que se proponen un grupo de medidas con el objetivo básico de aumentar la eficiencia energética de la industria azucarera cubana.

Aunque el consumo de vapor promedio es un elemento básico y es el reportado usualmente en los análisis energético de estas industrias debe considerarse otro indicador que es la estabilidad en el consumo, su intermitencia en el equipamiento tecnológico provoca picos de consumo, altamente perjudicial para el balance energético y para el proceso tecnológico en general.

3.2 Medidas propuestas para minimización de consumo de vapor en la industria

En función de los resultados obtenidos y con el objetivo de minimizar consumos y aumentar la eficiencia del proceso productivo se proponen las siguientes medidas:

1. Realizar el desvío del jugo de los filtros para otros procesos.

2. Instalar evaporadores de película descendente.
3. Instalar tachos continuos.

3.3 Evaluación económica de las medidas propuestas

Se realiza una evaluación económica en el proceso de producción de azúcar crudo para ver la factibilidad de la utilización de evaporadores de película descendente y la instalación de tachos continuos. Por internet se han obtenido precios preliminares que permiten realizar un análisis dinámico de la inversión, se consideran ganancias los ahorros obtenidos por la disminución en el consumo de vapor, el consumo de agua y productos químicos empleados en la limpieza del equipamiento.

3.3.1 Efecto de la extracción del jugo de los filtros

En la producción de azúcar crudo, el jugo de los filtros es un material azucarado de baja calidad, pero con un contenido de azúcares aún considerable, por lo que es devuelto al proceso. En la práctica esta operación, justificada teóricamente por la recuperación de azúcar, se conoce que es uno de los elementos que conspira contra la eficiencia del proceso. Cuando existe otra vía para la utilización económica de este producto, como su entrega a una destilería o fábrica de torula, es que resulta recomendable el análisis técnico-económico de su extracción total o parcial.

Es evidente el efecto negativo de la extracción del jugo de los filtros en las cantidades de azúcar crudo y miel final a obtener. Dando al traste con esto se muestra un ahorro energético y un aumento de la disponibilidad de bagazo para otros usos, lo que representa un incremento del bagazo disponible debido a un sustancial ahorro de vapor.

Este procedimiento tecnológico ha sido estudiado por diferentes autores (Rodríguez Plaza; De Armas Martínez; González Suarez) y concluyen que resulta viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, por tanto, nos centraremos en el análisis económico de las dos restantes variantes (Rodríguez Plaza, 2016).

3.3.2 Inversión de evaporadores de película descendente. Evaluación económica

Se toma como base de cálculo que la industria trabajará durante 150 días al año. Se realizan, además, otras consideraciones: los evaporadores instalados en la industria se limpiarán 15 veces por zafra (esto corresponde a la práctica cotidiana de limpieza

cada 10 días), mientras que en los evaporadores de película propuestos solo se necesita de 10 limpiezas, en función de sus ventajas descritas en la revisión bibliográfica.

Datos utilizados para el análisis en el quíntuple efecto evaporador

Caña molida: 4600 t/d (información del departamento técnico de la industria)

Precio del vapor 10 \$/t(www.quiminet.com, 2019)

Cantidad de ácido clorhídrico técnico utilizada: 180 kg de ácido por cada vaso en una limpieza(MINAZ, 2017).

$$\text{cantidad de ácido clorhídrico} = 180 \text{ kg} * 5\text{vasos}$$

Cantidad de ácido clorhídrico=900 kg=0,90 t

Precio del ácido clorhídrico: 260 \$/t(<https://spanish.alibaba.com>, 2019)

Cantidad de NaOH: 5t por limpieza(MINAZ, 2017)

Precio del NaOH: 1656 \$/t (<https://www.vadequimica.com>, 2019)

Se consumen 2 m³ de agua por enjuague en cada vaso y cada limpieza lleva tres enjuagues con agua, por tanto, se consumen en el proceso de enjuague 6 m³ de agua en cada vaso y 30 m³ en el quíntuple efecto.

Los datos son procesados en hojas de cálculo Excel teniendo en cuenta la metodología propuesta por Peters and Timmerhaus(Peters, 2003).

Cálculos para introducir los datos en el Excel

Toneladas de caña procesada por año:

$$4600 * 150 = 690000 \text{ t/año}$$

Vapor ahorrado: según(CASSA, 2017)

$$\text{Vapor ahorrado} = 4.5\% * \text{caña molida}$$

Vapor ahorrado: 31050 t vapor/año

Consumo total de Hidróxido de sodio al año en los evaporadores instalados (CT_{sosa1}):

$$CT_{sosa1} = cant\ sosa\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Consumo total de sosa al año en los evaporadores propuestos (CT_{sosa2}):

$$CT_{sosa2} = cant\ sosa\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Consumo total de ácido clorhídrico al año en los evaporadores instalados ($CT_{ácido1}$):

$$CT_{ácido1} = cant\ ácido\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Consumo total de ácido al año en los evaporadores propuestos ($CT_{ácido2}$):

$$CT_{ácido2} = cant\ ácido\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Consumo total de agua al año en los evaporadores instalados (CT_{H2O1})

$$CT_{H2O1} = cant\ H2O\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Consumo total de agua al año en los evaporadores propuestos (CT_{H2O2})

$$CT_{H2O2} = cant\ H2O\ por\ limpieza * \#de\ limpieza\ al\ año$$

Tabla 9: Resumen de cálculos. Ahorro de productos químicos y agua en la nueva propuesta tecnológica.

Aspectos	Evaporadores instalados	Evaporadores propuestos	Ahorro de productos
Cantidad total de sosa(t/año)	75	50	25
Cantidad total de ácido(t/año)	13,5	9	4,5
Cantidad total de H2O (m ³ /año)	450	300	150

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis se consideran como ganancias el ahorro de vapor, agua y productos químicos.

Variantes propuestas

Con vistas a realizar análisis preliminares en función de los costos reportados por la literatura se proponen dos variantes, I y II, diferenciándose entre sí solamente por el costo de inversión del equipamiento.

3.3.3 Resultados Variante I

Con los datos anteriores se realiza el análisis dinámico, los principales datos y resultados se resumen a continuación:

Tabla 10: Resultado del análisis de sensibilidad.

Costo del equipamiento (\$)	183 333.30
Capital total invertido (\$)	630 666.552
Valor actual neto VAN(\$)	1,260,063.26
Tasa Interna de Rend. TIR (%)	41
PRD (años)	3.1

Fuente: elaboración propia.

* Para los cálculos se utilizó la metodología propuesta por Peters and Timmerhaus.

La gráfica con el perfil del tiempo de recuperación de la inversión se muestra a continuación:

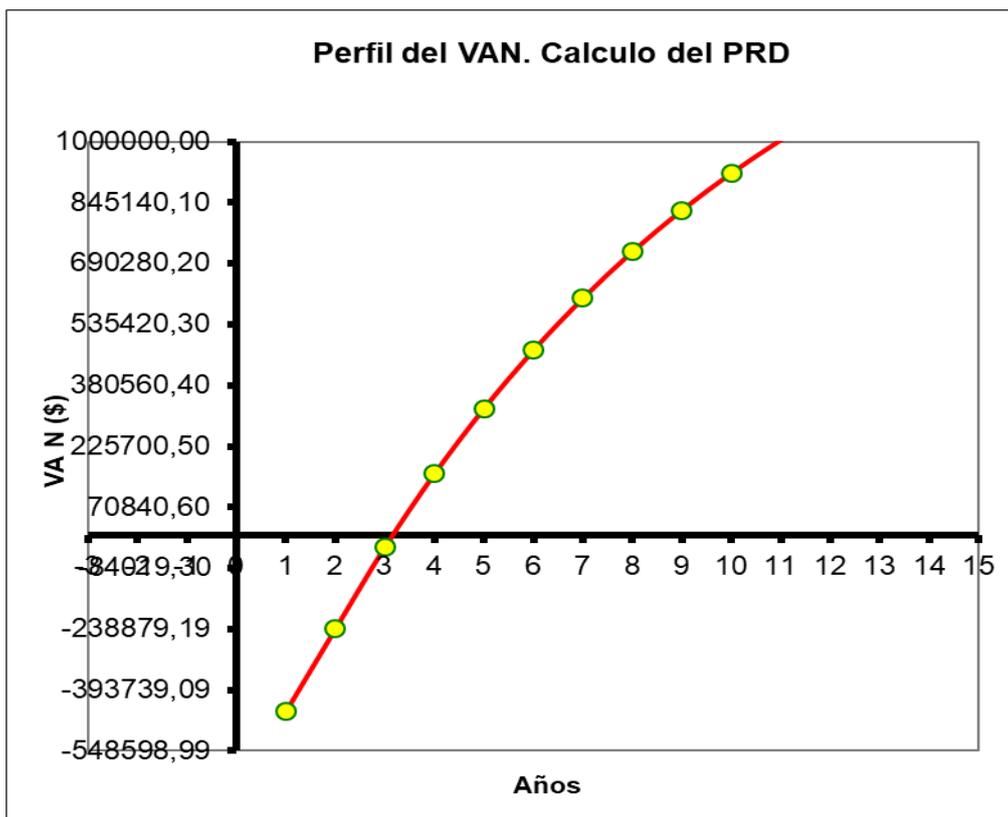


Figura 15: Perfil del tiempo de recuperación de la inversión variante I

3.3.4 Resultados Variante II

Con los datos anteriores se realiza el análisis dinámico, los principales datos y resultados se resumen a continuación:

Tabla 11: Resultado del análisis de sensibilidad.

Costo del equipamiento (\$)	366 665.00
Capital total invertido (\$)	1 261 327.600
Valor actual neto VAN(\$)	595,443.30
Tasa Interna de Rend. TIR (%)	20
PRD (años)	7,3

Fuente: elaboración propia.

* Para los cálculos se utilizó la metodología propuesta por Peters and Timmerhaus.

La gráfica con el perfil del tiempo de recuperación de la inversión se muestra a continuación:

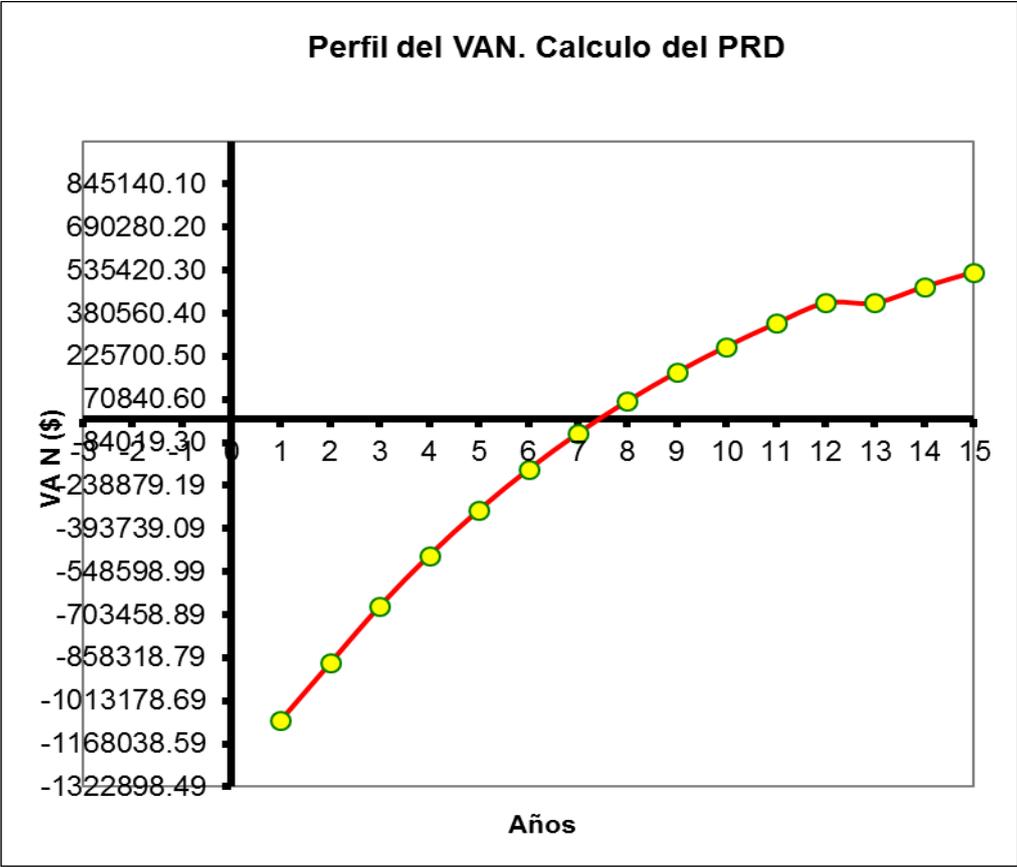


Figura 16: Perfil del tiempo de recuperación de la inversión variante II.

3.3.5 Análisis de las variantes

Como se demuestra en los resultados; la variante número I es la más factible para realizar la inversión pues el período de recuperación de la inversión (PRD) va a ser más rápido que la del segundo. Los indicadores dinámicos indican una inversión más atractiva, el objetivo fundamental de este análisis es alertar como los precios fluctuantes y crecientes del mercado pueden desfavorecer una inversión que representa un salto tecnológico invaluable para la industria azucarera cubana.

3.3.6 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza en la variante más atractiva económicamente (variante I) considerando una posible subida de los precios de los insumos fundamentales del proceso: Vapor, agua y productos químicos.

Teniendo en cuenta que como se consideran las ganancias de la inversión como el ahorro neto de los productos, anteriormente mencionados, al aumentar el precio de estos productos en el mercado la inversión se hace más atractiva y necesaria para la industria cubana.

Para este análisis se ha considerado un posible aumento del orden de 10% y 20% de los precios de los insumos.

En las condiciones actuales de referencia el análisis de sensibilidad da como resultado que el PRD de la inversión es de 3.1 años. Con un aumento porcentual del 10 % el PRD es de 2.9 años y en el caso de un aumento del orden del 20 % de los precios de los insumos el PRD se reduciría a 2,6 años. Según estudios de la literatura consultada los precios de las materias primas e insumos básicos se han incrementado en los últimos años y se prevé que continúen con esta tendencia. A continuación, se muestran los perfiles del PRD para ambos casos:

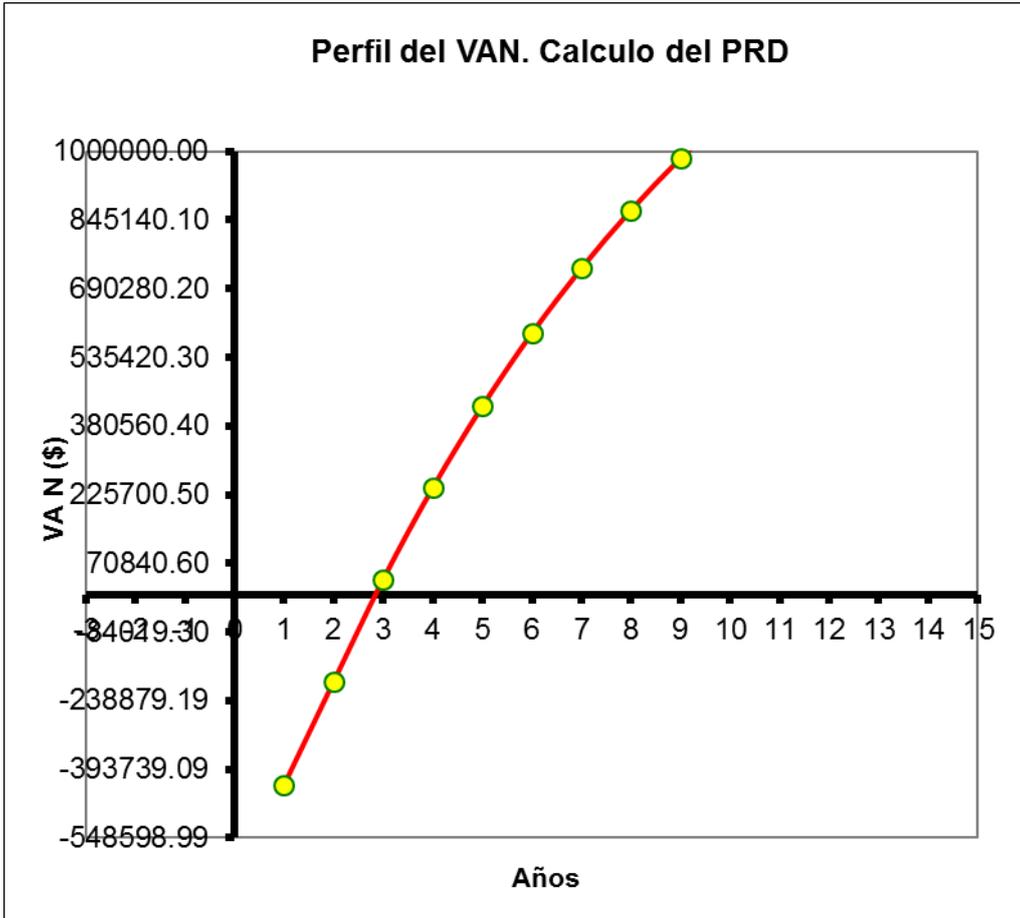


Figura 17: Perfil del PRD considerando un aumento del 10% en el precio de los insumos.

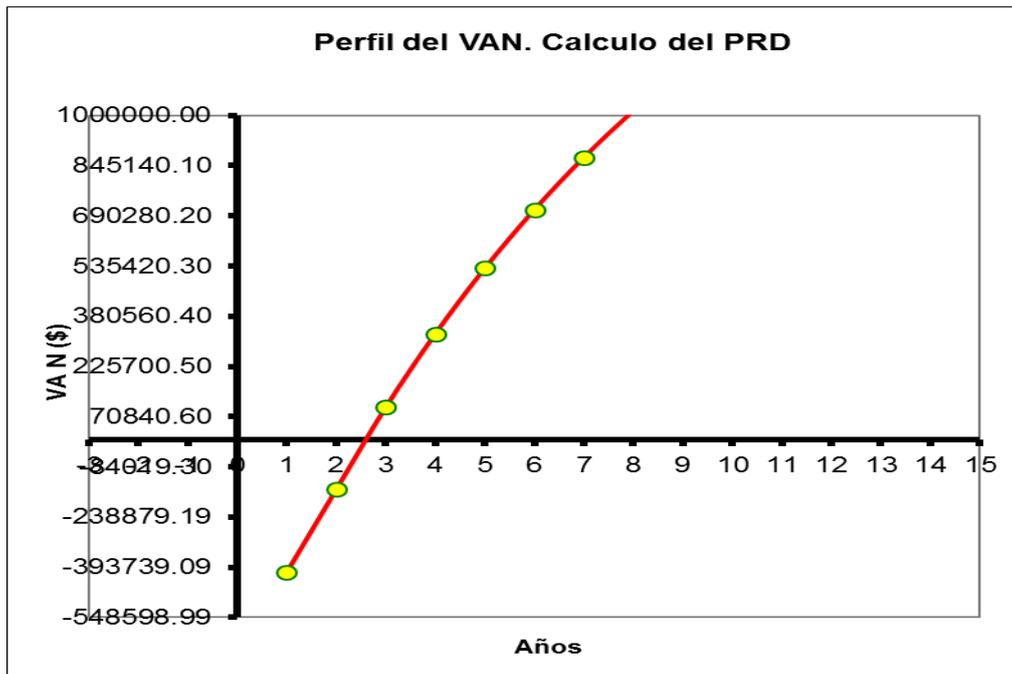


Figura 18: Perfil del PRD considerando un aumento del 20 % en el precio de los insumos.

Como una forma de visualizar mejor los resultados obtenidos en este análisis y como método de extrapolar los resultados a continuación se muestra una gráfica con las tendencias.

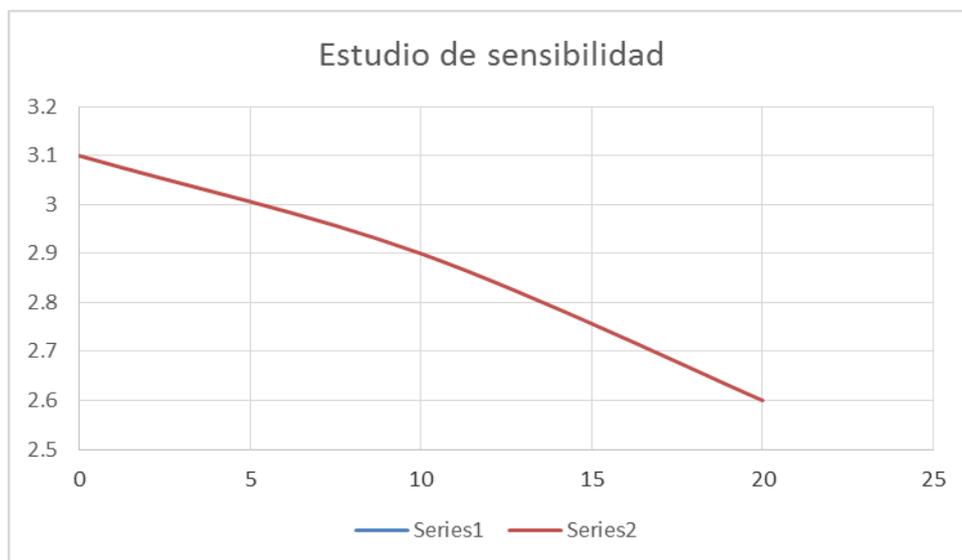


Figura 19: Resultados obtenidos en el estudio de sensibilidad.

En el desarrollo del proceso inversionista muchas veces se intenta disminuir tiempo y recursos materiales y financieros a expensas de reducción de los costos de los diferentes ítems del proceso inversionista. El presente análisis de sensibilidad se

efectuó en la variante I, disminuyendo gastos en el proceso inversionista, fundamentalmente en lo referido a costos de instalación, instrumentación y control, instalación de tuberías y sistemas eléctricos. Los resultados obtenidos no muestran nada significativo, ni atrayente, lo que demuestra que en el proceso no deben disminuirse los costos a expensas de la calidad de la inversión. En la siguiente gráfica se muestra el perfil del PRD para este análisis.

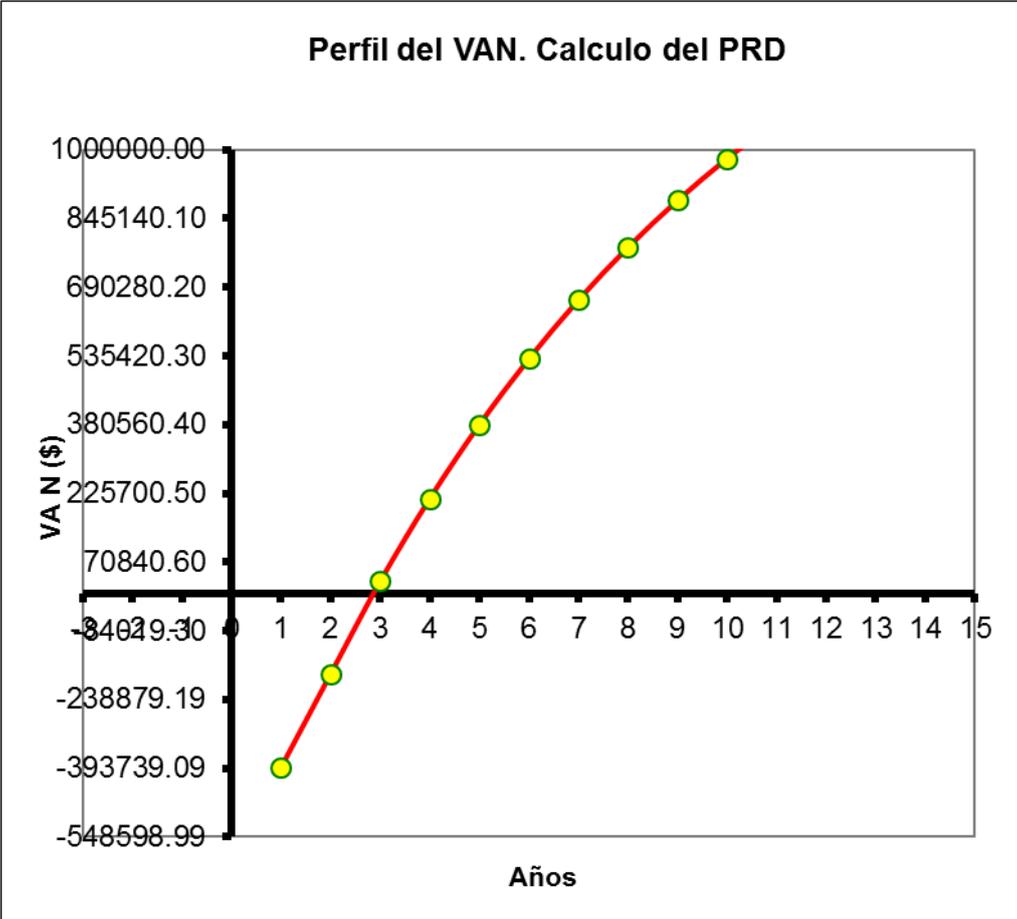


Figura 20: Perfil del PRD para una disminución en los gastos del proceso inversionista

El PRD en este análisis nos da que es 2,9 años por lo que se considera que las disminuciones de los costos de estos ítems no justifican ahorros a expensa de la calidad en el proceso inversionista.

3.4 Evaluación económica de los tachos continuos

Se toma como base de cálculo que la industria trabajara durante 150 días al año.

En la literatura (<https://www.alibaba.com>) se da a conocer el costo de un tacho continuo.

Cálculos para introducir los datos en el Excel

Toneladas de caña procesada por año:

$$4600 * 150 = 690000 \text{ t/año}$$

Vapor ahorrado: según (CASSA, 2017)

$$\text{Vapor ahorrado} = 3.6 \% * \text{caña molida}$$

Vapor ahorrado: 24840 t vapor/año

Agua ahorrada: 75 t /año

Para el análisis se consideran como ganancias el ahorro de vapor y de agua.

3.4.1 Resultados de la variante

Con los datos anteriores se realiza el análisis dinámico, los principales datos y resultados se resumen a continuación:

Tabla 12: Resultado de las variantes.

Costo del equipamiento (\$)	225000,00
Capital total invertido (\$)*	774000,000
Valor actual neto VAN (\$)	499.474,46
Tasa Interna de Rend. TIR (%)	22
PRD (años)	6.1

Fuente: elaboración propia.

* Para los cálculos se utilizó la metodología propuesta por Peters and Timeraus.

La gráfica con el perfil del tiempo de recuperación de la inversión se muestra a continuación:

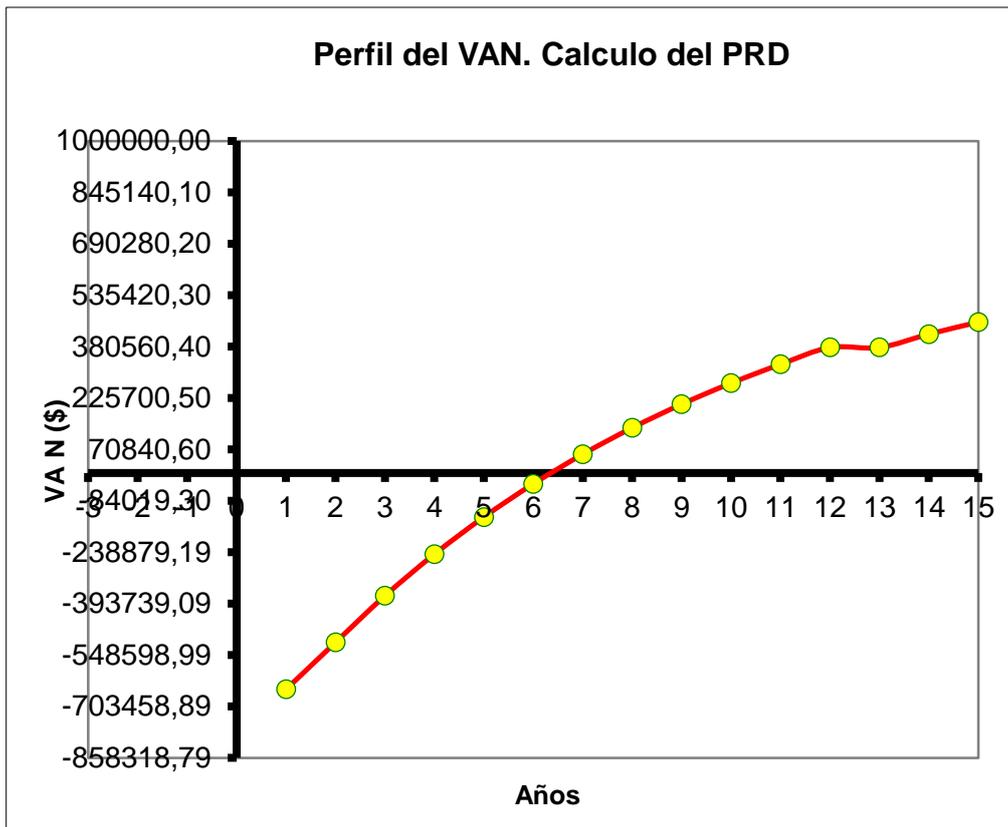


Figura 21: Perfil del PRD

Los resultados preliminares obtenidos para el análisis económico de tachos continuos indican que en esas condiciones la inversion no resulta atrayente en las condiciones de la industria azucarera cubana. Es preciso realizar nuevas investigaciones y valoraciones para tener más criterios. Se impone una transferencia tecnologica Sur Sur, desde países de America Latina para la preparacion de este proyecto.

Discusión general de los análisis económicos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos podemos concluir que el proceso inversionista propuesto aumenta la competitividad de la industria azucarera cubana, elevando su nivel tecnológico a estándares internacionales. No obstante las condiciones económicas del país precisa de un orden inversionista para ser más eficiente en los procesos productivos. En lo referente a la inversión de evaporadores de película, inversión que oscila entre \$630 666.552 y \$ 1 261 327.600, resulta atractiva ya que disminuye los consumos de agua, vapor y otros insumos básicos y su PRD oscila entre los 2.9 y 2.6 años. Téngase en cuenta que en Cuba existe

experiencia en la instalación, operación y mantenimiento de estos equipos, aunque instalados en otras industrias.

En el caso de la inversión propuesta en tachos continuos los índices económicos no resultan tan atractivos, por el contrario, cálculos preliminares indican tiempo de recuperación de la inversión superior a los seis años. Esta tecnología se aplica en algunos países, pero en el caso de Cuba no existe experiencias previas de su utilización.

Conclusiones parciales

- Los preevaporadores instalados en la industria presentan un consumo específico de vapor superior al reportado en la literatura.
- Los evaporadores y tachos presentan un consumo específico de vapor en el rango reportado en la literatura.
- El consumo de vapor no es estable en el tiempo, provocando picos de consumo que afectan la eficiencia energética.
- Según estudios preliminares (variante I) la inversión de evaporadores de película resulta atractiva con un VAN de \$ 1,260,063.26 y PRD de 3.1 años.
- La instalación de evaporadores de película reduce el consumo de agua, vapor y productos químicos.
- La inversión de tachos continuos, según estudios preliminares no es atractiva y debe valorarse la factibilidad de una transferencia tecnológica sur sur.

Conclusiones

- Parte del equipamiento instalado presenta obsolescencia tecnológica, lo que perjudica la eficiencia general de la fábrica.
- Los indicadores de consumo energético, de forma general, están en los rangos recomendados por la literatura. No obstante, el consumo de vapor no es estable lo que perjudica la eficiencia energética general.
- Dentro de las medidas propuestas para mejorar el balance energético están desviar el flujo de jugo de los filtros para otros procesos tecnológicos y la instalación de evaporadores de película y tachos continuos.
- La inversión referida al montaje de evaporadores de película presenta una evaluación económica preliminar favorable con indicadores que la hacen atractiva.
- Desde el punto de vista ambiental la inversión de evaporadores de película es positiva, logrando ahorro de vapor, agua y productos químicos.
- Según evaluación económica preliminar la instalación de tachos continuos no es atractiva en las condiciones de la industria azucarera actual.

Recomendaciones

- Presentar los resultados obtenidos a la dirección técnica de la UEB George Washington y a la dirección de AZCUBA.
- Proponer la instalación, de modo experimental, de evaporadores de película descendente en la industria azucarera.
- Continuar con los análisis económicos y propuesta de alternativas referidas al uso de tachos continuos en la industria azucarera cubana.
- Utilizar las potencialidades de la cooperación sur sur para la transferencia tecnológica en la industria azucarera cubana.

Bibliografía

1. A.K.FERNÁNDEZ 2013. Evaluación técnico-económica de alternativas de adaptación tecnológicas para biorrefinerías en una industria de la caña de azúcar.
2. A.PONZ 1887. *Termodinámica Técnica para ingenieros químicos*.
3. A.RUBIO 2000. Generadores de Vapor. Funcionamiento y explotación.
4. ANÓNIMO 1988. Manual de los derivados de la caña de azúcar”, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúca.
5. BALOH, T. A. W., ENRIQUE 1995. Energy Manual for Sugar Factories.
6. CABELLO, A. B. 2006. "La producción de derivados de la caña de azúcar en Cuba. Situación y perspectiva." ICIDCA.
7. CASSA, C. A. S. 2017. *Simulaciones de procesos para el ahorro de vapor en la industria azucarera* [Online]. Available: <https://www.quitecsa.com> [Accessed].
8. CHOU, C. Y. 1993.
9. E.HUGOT 1980. *Manual para Ingenieros Azucareros*.
10. ECURED 2018. La caña de azúcar.
11. ESPINOSA, R., CARRILLO, M. J., MACHADO, S. & REYMOND, A. 1984. *Sistema de utilización del calor*. .
12. FERNÁNDEZ, P. 2003. Turbinas de Vapor.
13. GEANKOPLIS, C. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*.
14. GONZÁLEZ, E. 2006. Posibilidades prospectivas de producción de bioetanol aprovechando integralmente los residuos agroindustriales sin agredir al medio ambiente.
15. HERNÁNDEZ DÍAZ, L. C. 2004. *GESTIÓN ENERGÉTICA EN LA FÁBRICA DE AZÚCAR CRUDO Y REFINO “GEORGE WASHINGTON”*. UCLV.
16. HTTP://SERTROL.COM. *Tachos-Continuos* [Online]. Available: http://sertrol.com/wp-content/uploads/2018/03/Tachos-Continuos_CEP_Instrumentaci%C3%B3n.pdf [Accessed].
17. HTTP://SERTROL.COM. *TachosContinuos_CEP_Instrumentación* [Online]. Available:

- http://sertrol.com/wpcontent/uploads/2018/03/TachosContinuos_CEP_Instrum entaci%C3%B3n.pdf [Accessed 2018/03].
18. [HTTP://WWW.FAO.ORG](http://www.fao.org/3/X4988E/x4988e10.htm). Available: <http://www.fao.org/3/X4988E/x4988e10.htm> [Accessed].
19. [HTTP://WWW.GEA-NIRO.COM](http://www.gea-niro.com). *evaporadores de película descendente* [Online]. Available: http://www.gea-niro.com.mx/lo-quesuministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp. [Accessed abril 2019].
20. [HTTP://WWW.OCU.COM](http://www.ocu.com) Efectos de los productos químicos.
21. [HTTPS://SPANISH.ALIBABA.COM](https://spanish.alibaba.com). 2019. *hydrochloric-acid-price* [Online]. Available: <https://spanish.alibaba.com/g/hydrochloric-acid-price.html> [Accessed].
22. [HTTPS://WWW.ALIBABA.COM](https://www.alibaba.com). *Precio cristalizador* [Online]. Available:
23. https://www.alibaba.com/showroom/sprice+continuous+crystallizers+sugar+industry.html?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=sprice+continuous+crystallizers+sugar+industry&isGalleryList=G [Accessed].
24. [HTTPS://WWW.ECURED.CU](https://www.ecured.cu). *Función de un generador de vapor* [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Generador_de_vapor#Funci.C3.B3n_de_un_generador_de_vapor [Accessed].
25. [HTTPS://WWW.ECURED.CU](https://www.ecured.cu). 2019. *Generador de vapor* [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Generador_de_vapor#Funci.C3.B3n_de_un_generador_de_vapor [Accessed].
26. [HTTPS://WWW.MONOGRAFIAS.COM](https://www.monografias.com). *Características Evaporadores de película descendente* [Online]. Available: <https://www.monografias.com/docs/Evaporadores-de-pelicula-de-pelicula-descendente-P3ZEJ6RYBY> [Accessed].
27. [HTTPS://WWW.PORTALCANIA.COM](https://www.portalcania.com). *Cuales son los principales países productores de azúcar* [Online]. Available: <https://www.portalcania.com.ar/noticia/conoce-cuales-son-los-principales-paises-productores-de-azucar> [Accessed abril 2019].
28. [HTTPS://WWW.VADEQUIMICA.COM](https://www.vadequimica.com) 2019. Precio sosa-caustica.

29. [HTTPS://WWW.VIX.COM](https://www.vix.com). 2019. *azúcar refinada efectos en la salud* [Online]. Available: <https://www.vix.com/es/imj/salud/4365/azucar-refinada-efectos-en-la-salud> [Accessed].
30. [HTTPS://YASALUD.COM](https://yasalud.com). 2010. *Fabricación de Azúcar Refino* [Online]. Available: <https://yasalud.com/azucares-refinados/> [Accessed Segunda Edición.].
31. ICIDCA 2016. Los derivados de la caña de azúcar.
32. ICIDCA 2017. Proceso de elaboración de azúcar crudo de caña.
33. MINAZ 2017. Manual del azúcar.
34. PETERS, T. A. W. 2003. Cost & Evaluation Workbook
35. R. ESPINOSA 1990. *Sistema de utilización del calor*.
36. RAIN, P. 2012. *Ingeniería de la caña de azúcar*.
37. RODRÍGUEZ PLAZA, R. 2016. *Evaluación prospectiva para transformar una fábrica de azúcar en biorrefinería*. UCLV.
38. TORRES, R. F. L. E. I. C. P. 2019. *Análisis de la Gestión Energética, Seguridad y Riesgos del proceso de Azúcar Refino en el central George Washintong*.
39. [WWW.CUBA.CU](http://www.cuba.cu) Caña de azúcar
40. [WWW.ECURED.CU](http://www.ecured.cu). Available: www.ecured.cu/index.php [Accessed abril 2019].
41. [WWW.QUIMINET.COM](http://www.quiminet.com). 2019. *Precio de referncia* [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/productos/vapor-de-agua-5000057221/precios.htm> [Accessed].

Anexos

Anexo 1: Diagrama de bloque del proceso de producción de azúcar crudo.



Figura 22: Diagrama de bloque del proceso de producción de azúcar crudo.

Anexo 2: Diagrama de bloque del proceso de producción de azúcar refinado.

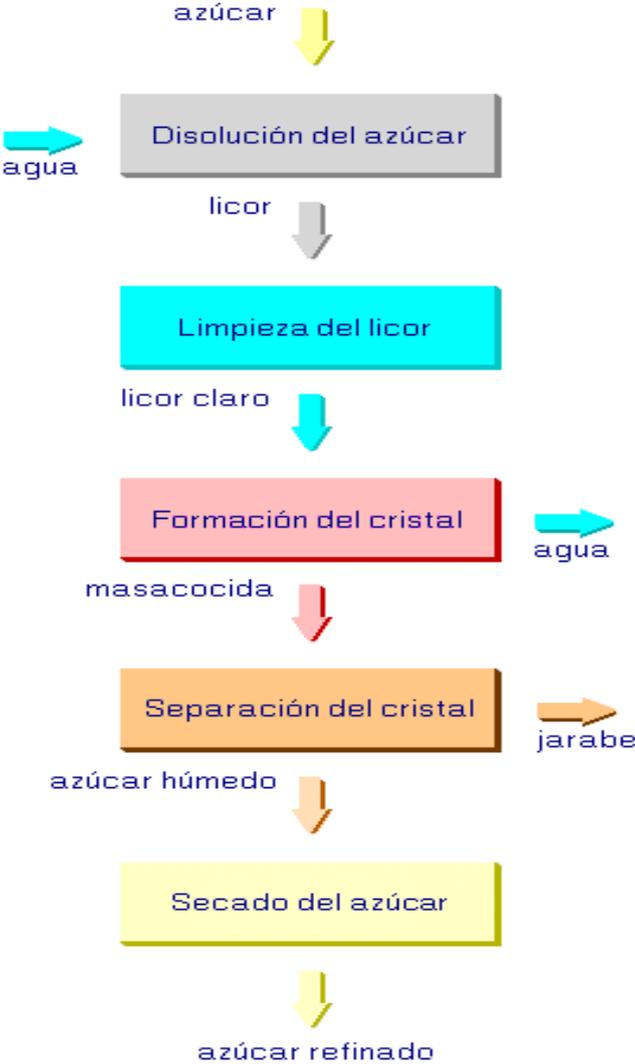


Figura 23: Diagrama de bloque del proceso de producción de azúcar refinado.

Anexo 3: Principales equipos consumidores de vapor

Tabla 13: Principales equipos consumidores de vapor en la industria.

Equipos	Consumidores de Vapor Escape	
	Consumo (t/h)	C. Calor (kW)
Preevaporadores	65.41	40143.0
Evaporador (Quíntuple Efecto)	13.52	8,300.2
Calentador 3 Jugo. Mezclado	5.91	3,624.6
Calentador Jugo Clarificado	3.88	2,378.8
Calentador de Licor Tratado	0.80	491.0
Calentador de Miel Afinación	0.36	220.9
Calentador de Solución Carbón	0.08	49.7
Otros + fugas	2.00	1,513.8
Equipos	Consumidores Vapor del Preevaporador	
Tachos Crudo	33.4	20,610.6

Anexo 4: Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar refinado.

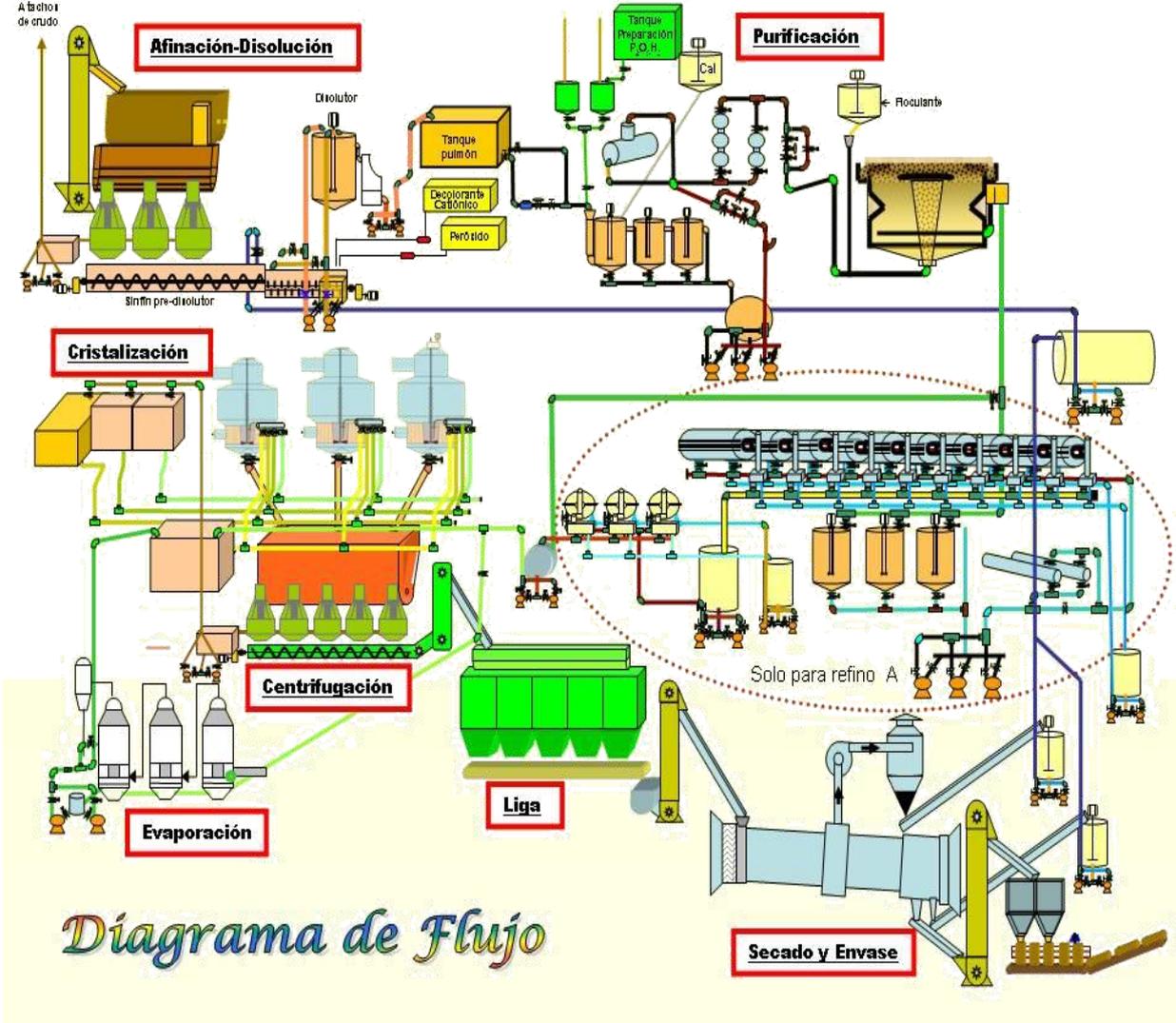


Figura 24: Diagrama de flujo

Anexo 5: Vista satelital del central George Washington.



Figura 25: Vista satelital del central George Washington