

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



Trabajo de Diploma

**TÍTULO: Evaluación simulada de esquemas de
generación y consumo de vapor primario en la
UEB Central Jesús Rabí.**

Autor:

Alvaro J. Macías Delgado

Tutores:

Ing. Elieser Alfonso Paret

Dr.C. Agustín Benítez Hernández

Matanzas, Cuba. Julio – 2020

Nota de aceptación

Presidente del tribunal:

Firma:

Miembro del tribunal:

Firma:

Miembro del tribunal:

Firma:

Miembro del tribunal:

Firma:

Dado en la Ciudad de Matanzas a los ____ días del mes de julio del año 2020.

Declaración de autoridad

Yo, Alvaro José Macías Delgado, me declaro como único autor de este trabajo realizado en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que el mismo sea utilizado por la mencionada institución como material de consulta. Para que así conste, debajo firma:

Alvaro José Macías Delgado

Resumen

El trabajo de diploma está dirigido a la evaluación simulada de esquemas de generación y consumo de vapor primario en la UEB Central Jesús Rabí. Para lo cual se plantea la necesidad de realiza un estudio simulado de la generación y consumo primario de vapor en la UEB. Se selecciona el simulador Cycle-Tempo, por ser el que mejor se adecúa al estudio de los ciclos de vapor y se crea el modelo para la simulación del proceso objeto de estudio. Se propone la simulación de casos de estudio de diferentes esquemas de generación y consumo de vapor.

Summary

The work has the purpose of simulating the evaluation of primary steam generation and consumption schemes at the UEB sugar mill Jesús Rabí. For which the need arises to carry out a simulated study of the generation and primary consumption of steam in the UEB. The Cycle-Tempo simulator is selected, since it is the one that best suits the study of steam cycles. The model is created to simulate the process under study. The simulation of case studies of different steam generation and consumption schemes is proposed.

Contenido

Introducción.....	1
Capítulo I: Análisis bibliográfico.....	3
1.1- Etapas principales del proceso de producción de azúcar crudo	3
1.2- Ciclos de potencia.....	7
1.2.1- Ciclo de Carnot.....	8
1.2.2- Ciclo Rankine.....	9
1.2.3- Ciclo Rankine con recalentamiento	10
1.3- Ciclo de potencia en el central azucarero	10
1.4- Análisis energético y energético.....	12
1.5- Eficiencia energética	13
1.6- Simulación.....	14
1.6.1- Simulación en la ingeniería.....	14
1.6.2- Importancia de la simulación	15
1.6.3- Aplicación	15
1.6.4- Fases de la simulación	16
1.6.5- Software utilizados para la simulación de sistemas.....	16
1.7- Cycle-Tempo.....	19
Capítulo II: Materiales y métodos	22
2.1- Descripción del área de generación de vapor y energía eléctrica.....	22
2.2 Metodología de trabajo con el software Cycle-Tempo	23
2.3 Validación del modelo obtenido.	27
Conclusiones.....	28
Bibliografía	29

Introducción

La UEB Central “Jesús Rabí” perteneciente al municipio de Calimete, es una industria que tiene como misión fundamental la producción de azúcar crudo de calidad, con el fin de comercializarla en el mercado internacional. De este proceso se obtiene también residuo leñoso (bagazo) que es usado como combustible en la generación de vapor y como materia prima en la elaboración de alimento animal.

La función principal del área de generación de vapor, es la producción de vapor de alta presión para ser utilizado en los turbogeneradores que producen el vapor de escape necesario para el proceso tecnológico, así como la electricidad necesaria para el autoabastecimiento. Entran en el proceso: agua tratada y condensada, que cambian su estado para convertirse en vapor directo. El calentamiento se genera en los hornos, usando como combustible fundamental, el propio bagazo proveniente de la planta moledora. De la disponibilidad y estabilidad del vapor depende el éxito de cualquier sistema de evaporación y cocción de masas cocidas.

En esta etapa existen dos calderas que se encargan de generar el vapor utilizando el residuo leñoso como combustible. El producto de las calderas es recibido por tres turbogeneradores que se encargan de generar la electricidad necesaria para abastecer el proceso productivo.

Con el proyecto de construcción de una bioeléctrica en el poblado donde se encuentra el central, para aprovechar la biomasa cañera como parte de su combustible y de la cual procederá el vapor usado en el área de purificación es necesario realizar el análisis energético y exergético del consumo de vapor primario en el central.

Problema:

¿Cómo mejorar la eficiencia energética de la UEB Central Jesús Rabí para su integración con una central bioeléctrica?

Hipótesis:

¿Si se realiza un estudio simulado de la generación y consumo primario de vapor en la UEB, se podrá proponer un plan de mejoras para aumentar la eficiencia energética?

Objetivos:

- Evaluar, mediante simulación, diferentes esquemas de generación y consumo de vapor primario en la UEB Central Jesús Rabí.

Objetivos específicos:

- Conocer los diferentes esquemas de generación y consumo de vapor mediante una búsqueda bibliográfica.
- Identificar al software de simulación que mejor se adecue para los esquemas de generación y consumo de vapor
- Realizar el balance energético y exegético del consumo de vapor primario en el central Jesús Rabí
- Simular casos de estudio de diferentes esquemas de generación y consumo de vapor.

Capítulo I: Análisis bibliográfico

1.1- Etapas principales del proceso de producción de azúcar crudo

El proceso de fabricación de azúcar crudo consta de las siguientes etapas: extracción o molienda, alcalización, calentamiento, clarificación, evaporación, cristalización y centrifugación (van der Poel, et al., 1998). Según Hugot (1986), el proceso comienza en el pesaje de las unidades que transportan la caña de azúcar, en esta parte se determina la calidad de la materia prima. La caña que llega a la fábrica se descarga sobre las mesas de alimentación, luego se somete a un proceso de preparación que consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de desfibradoras o desmenuzadoras para poder pasar al proceso de extracción del jugo (Ayala, 2012).

Etapa de extracción y molienda.

Según Morales, et al. (2010), la caña preparada se somete al proceso de molienda para extraer el jugo de caña. Del 60 al 70% del jugo se extrae por la presión que ejerce el primer molino, subsecuente el flujo disminuye y el jugo remanente en el bagazo se extrae por una combinación de lixiviación y presiones periódicas en los molinos restantes. Este método de extracción por lixiviación es conocido como imbibición, según Cardona (2009).

Pedrosa (1983) establece que el valor de la temperatura de agua de imbibición tiene que estar entre 75 y 80 °C, lo cual facilita la extracción y evita el desarrollo microbiano. Sin embargo, Posada (1987) y Rein (2007) recomiendan que la temperatura del agua de imbibición no debe exceder de los 85 °C para evitar que el derretimiento de las ceras de la caña ocasione que patinen las mazas de los molinos.

Etapa de alcalización.

El jugo procedente de los molinos es ácido y turbio, por ello se introduce en la etapa de alcalización, que consiste en agregar hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), al jugo con el objetivo de neutralizar su acidez; este proceso es fundamental para lograr una clarificación eficiente y evitar la destrucción de azúcares e inversión

de la sacarosa. Cuando el pH es menor de 7 la clarificación es deficiente y la pérdida por inversión aumenta; mientras, cuando es mayor de 8 se produce la destrucción de los azúcares reductores, exceso de incrustaciones en los evaporadores, aumento de producción de mieles, aumento de color, y azúcar de baja calidad (Rein, 2007).

Etapas de calentamiento

Según Pérez (2009) y Morales, et al. (2010), la temperatura del jugo alcalizado a la salida de los calentadores está entre 103 y 105 °C con el objetivo de favorecer el proceso de coagulación en la etapa de clarificación. Rein (2007) establece que la temperatura del jugo tiene que ser superior al punto de ebullición, que se comprende entre 102 y 104 °C, por encima de este intervalo de temperatura se produce destrucción de los azúcares, formación de color y caída excesiva del pH.

Etapas de clarificación.

En la etapa de clarificación se busca eliminar las impurezas solubles e insolubles presentes en el jugo. Se separa el jugo en dos partes, el jugo clarificado y los precipitados sedimentables, espumas y lodos. Los lodos son el sedimento o precipitado que contiene sales insolubles, fosfatos de calcio, ceras, gomas y sacarosa (Morales, et al, 2010). Según Herrera (2011), la clarificación del jugo tiene como objetivo producir un precipitado de composición compleja que contiene sales insolubles de cal, albúmina coagulada, ceras, grasas y gomas que contiene el jugo de caña, debido a que estas son precursoras de color y turbiedad. Con la coagulación de las impurezas se desencadenan reacciones químicas que hacen posible las colisiones entre partículas, estas tienen lugar tras la adición de la cal, la cual reacciona con sustancias cargadas negativamente presentes en el jugo para formar compuestos insolubles o macromoléculas de lodos, que finalmente son las que se extraen para que el jugo quede claro. Las reacciones de precipitación inician con la formación del fosfato monocalcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) y dicálcico (CaHPO_4), según Doherty y Rackemann (2009) y Greenwood, et al. (2011). Una vez que las impurezas coagulan, se introduce un proceso de

floculación porque permite que estas sedimenten en un menor tiempo posible para poder producir un jugo claro y proseguir con el proceso de elaboración del azúcar.

Etapas de filtración

Para recuperar la sacarosa remanente, el precipitado que se forma en la clarificación se somete a un proceso de filtración, generalmente se emplea filtros rotatorios al vacío; en estos equipos se adiciona bagacillo y agua de lavado a la cachaza para facilitar la filtración. El filtro consiste en un tambor rotatorio cubierto de láminas de metal perforado, que se sumerge en un baño de cachaza. A medida que gira se aplica vacío, se adhiere una torta fina sobre el tambor, que pasa por duchas lavadoras con agua caliente, para obtener una mayor recuperación de sacarosa en el jugo filtrado. Después de lavada la torta, se seca por la acción del vacío, el cual es retirado posteriormente para poder desprender la torta del tambor mediante raspadores (Herrera, 2011). Para obtener mejor eficiencia en el filtrado es necesario conocer que los jugos alcalinos filtran mejor que los jugos ácidos o neutros, por esta razón generalmente se agrega cal a la cachaza, antes de enviarlas a la filtración y el pH se establece entre 8 y 8,5. De la filtración se obtienen dos corrientes; un jugo filtrado de calidad intermedia que se recircula al tanque de alcalizar y un residual que se conoce como torta o cachaza (Hugot, 1986).

Etapas de evaporación

En esta etapa se evapora la mayor cantidad de agua contenida en el jugo claro, de forma tal que se logre su concentración sin llegar a la condición de saturación, para ello se requiere de un preevaporador y un cuádruple efecto (Hugot, 1986). Cardona (2009), plantea que el jugo clarificado se somete a evaporación en un conjunto de evaporadores serie; donde se elimina gran parte del agua contenida en el jugo (alrededor del 80%), de lo cual resulta un material denso llamado meladura, según Pérez (2009), la meladura debe tener una concentración próxima a los 65 °Bx.

Etapa de cristalización

En la etapa de cristalización la meladura se envía a los tachos al vacío, donde se introducen núcleos de sacarosa previamente formados, de tamaño homogéneo para lograr un crecimiento de los cristales de azúcar de manera uniforme. Este proceso incluye, equipos que comúnmente se les llaman cristalizadores, donde se intenta lograr el agotamiento de la sacarosa contenida en la miel que acompaña al cristal, formado por enfriamiento (Hugot, 1986). El producto creado después de la formación de los cristales del tamaño y pureza deseados, es conocido como masa cocida; en el tacho, la masa está sobresaturada de sacarosa, en una solución sobresaturada exenta de cristales no siempre el exceso de sacarosa disuelta se deposita o separa de la solución, pero si se agrega a la solución una porción de cristales de soluto, el exceso comienza a depositarse, es decir, a cristalizar. El proceso de cristalización consiste, después de haber alcanzado el estado de sobresaturación adecuado en dos etapas distintas: nucleación y crecimiento de los núcleos o cristales (Páez, 2013).

Etapa de centrifugación

En esta etapa la masa cocida se lleva hacia las centrífugas para separar el cristal de azúcar de la miel. Las centrífugas son equipos que giran a altas revoluciones por minuto y poseen en su interior una malla de finos agujeros que permiten solamente el paso de la miel, mientras que bloquea el paso de los granos de azúcar, los cuales permanecen atrapados en la parte interna de la malla. La miel obtenida al centrifugar la masa primera se conoce como miel primera y se utiliza para elaborar los cocimientos de la masa segunda, la cual se centrifuga en diferentes centrifugas a las usadas anteriormente. La miel obtenida al centrifugar la masa segunda se conoce con el nombre de miel segunda y se usa para elaborar otro tipo de masa, conocida como masa tercera y que al centrifugarla da una miel conocida como miel final o miel de purga, de la cual es muy difícil recuperar más sacarosa por el mecanismo de cristalización (Páez (2013), porque es un subproducto del proceso fabril y no retorna al proceso por su bajo contenido de sacarosa (Cardona, 2009).

1.2- Ciclos de potencia

Según Silgado Correa (2018), los ciclos de potencia como comúnmente se conocen a los dispositivos cíclicos generadores de potencia, son de gran importancia en estudios termodinámicos debido a que varias máquinas y sistemas se basan en su funcionamiento. En el análisis de estos ciclos es muy común considerar despreciable el efecto de la energía cinética en los dispositivos que incluyen trabajo de eje, como las turbinas, compresores y bombas, a diferencia de dispositivos como las toberas aceleradoras y difusores donde ésta es significativa, debido a su diseño para crear grandes cambios de velocidad.

En los ciclos de potencia, se extrae calor (combustible), de un foco a alta temperatura, se obtiene trabajo útil y se cede calor residual, a un foco a baja temperatura.

Según (Balderrama, 2014) los ciclos de potencia se clasifican en:

- Ciclo de potencia:
 - ✓ Ciclo de gas.
 - ✓ Ciclo de vapor.
- Ciclo de refrigeración.
 - ✓ Ciclo de gas.
 - ✓ Ciclo de vapor.

Entre los ciclos de refrigeración de vapor están:

- Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.
- Ciclo en cascada.
- Ciclo por compresión múltiples etapas.
- Ciclo por absorción.

Ciclo de refrigeración de gas:

- Ciclo de Brayton invertido.

Ciclo de potencia de gas:

- Ciclo Otto.
- Ciclo Diesel.

- Ciclo de Brayton:
 - ✓ Simple.
 - ✓ Con regeneración.
 - ✓ Con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración.

Ciclo de potencia de vapor:

- Ciclo de Carnot.
- Ciclo de Rankine:
 - ✓ Simple.
 - ✓ Con recalentamiento.
 - ✓ Con regeneración
- Ciclos de vapor Binarios.
- Ciclos combinados Gas-Vapor.

Una de las áreas de aplicación más importantes de la termodinámica es la producción de potencia eléctrica mediante plantas de potencia de vapor. Las plantas de potencia de vapor de agua trabajan fundamentalmente con el mismo ciclo básico, sin importar la naturaleza del suministro de energía (Medina et al., 2019).

Un ciclo ideal de potencia que utilice vapor de agua se compone de procesos de transferencia de calor a presión constante (hacia el fluido de trabajo en el generador de vapor y desde el fluido de trabajo en el condensador) y de procesos de trabajo adiabático (adición de trabajo por la bomba y entrega de trabajo por la turbina). La máquina ideal de ignición por chispa se compone de procesos adiabáticos y a volumen constante. El combustible y el aire se comprimen adiabáticamente y la combustión subsiguiente se idealiza como un calentamiento a volumen constante. Los gases calientes se expanden adiabáticamente, realizando un trabajo. Entonces, los gases al escape disipan calor a volumen constante (Kirillin et al., 1976)

Dos ciclos termodinámicos básicos de vapor son el ciclo de Carnot (ideal), y el ciclo de Rankine (real), que tiene diferentes variantes.

1.2.1- Ciclo de Carnot

Los elementos esenciales del ciclo son como se muestra en la *Figura 1*:

- la turbina de vapor, (1-2) donde el vapor se expande, obteniendo trabajo.

- un condensador, (2-3) donde condensa el vapor saliente de la turbina a temperatura y presión constantes.
- una bomba, (3-4) en la que se eleva la presión isoentrópicamente
- una caldera, (4-1) a temperatura y presión constantes donde se vaporiza el agua.

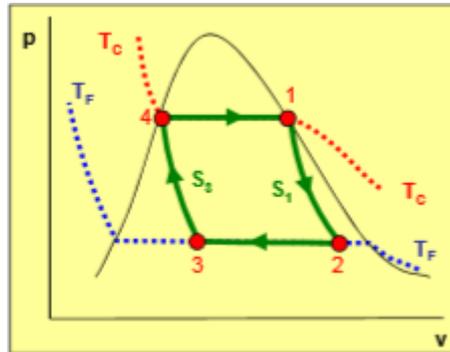


Figura 1. Diagrama de TvS del ciclo de Carnot.

El trabajo absorbido en la bomba, en primera aproximación, se desprecia, ya que el obtenido en la turbina es mucho mayor

El ciclo de Carnot presenta dos problemas prácticos los cuales son que la bomba trabaja mal si lo hace con vapor y si la expansión se realiza en la zona de vapor saturado corren peligro los álabes de la turbina, hay que limitar la formación de agua líquida.

1.2.2- Ciclo Rankine

El ciclo real trabaja con cambio de fase. Para evitar líquido en la turbina, se aumenta la temperatura de entrada, se denomina sobrecalentamiento (1-1') como se muestra en la *Figura 2*.

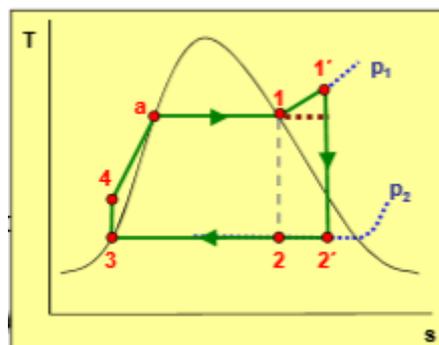


Figura 2. Diagrama de TvS del ciclo Rankine.

Para mejorar el rendimiento en este ciclo hay que aumentar la presión y la temperatura en la caldera, disminuir la temperatura de salida de la turbina. Además se debe respetar la temperatura máxima de la caldera, limitada por los materiales de construcción, evitar trabajar en la zona de vapor saturado y considerar la temperatura mínima que se dispone para condensar.

1.2.3- Ciclo Rankine con recalentamiento

Tras expandir el vapor en una turbina de alta presión se recalienta para volver a ser expandido en una turbina de baja presión como se muestra en la *Figura 3*, es posible encontrar turbinas que incluyan las dos etapas.

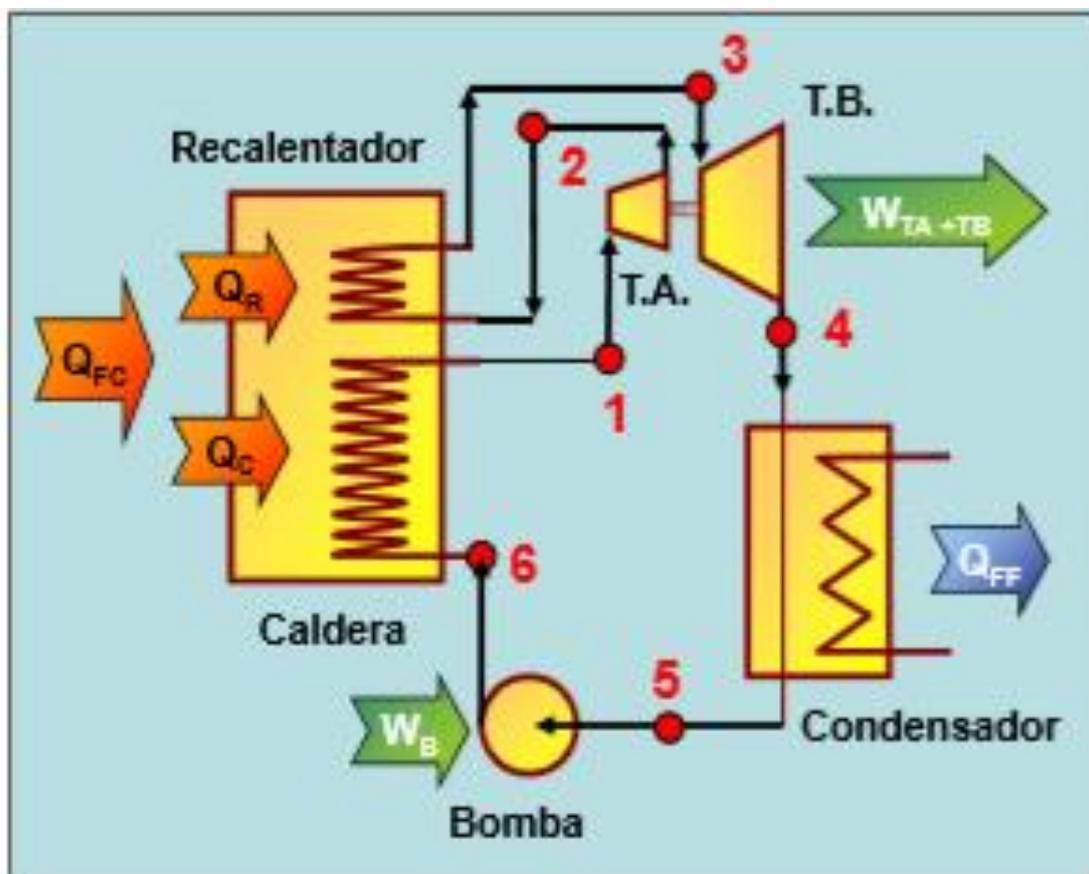


Figura 3. Ciclo Rankine con recalentamiento.

1.3- Ciclo de potencia en el central azucarero

En los centrales azucareros, así como en cualquier otro tipo de industria que utilice vapor en su proceso, paralelamente con los consumidores de energía eléctrica, existen los consumidores de calor (proceso). En el generador de vapor éste se produce a una presión elevada y se dirige a la turbina, donde

sufre una expansión solo hasta la presión necesaria para el proceso, en el cual se realiza la entrega de calor necesaria y en forma de condensado regresará por completo o en parte al generador de vapor (Sánchez et al., 2010).

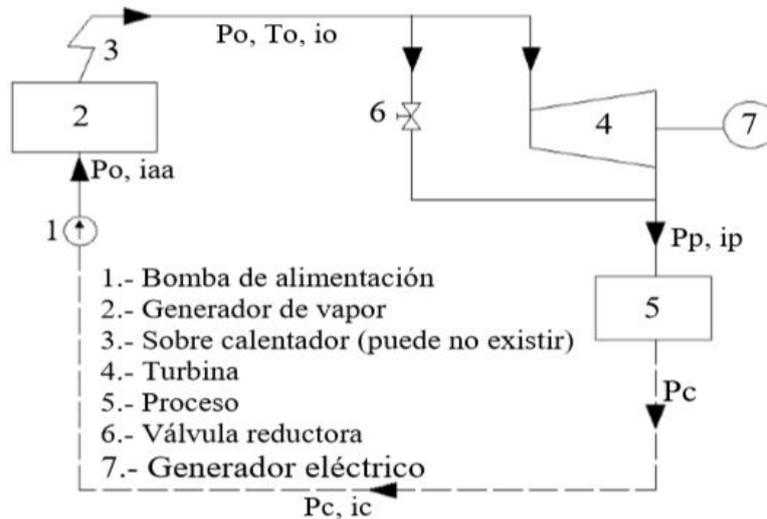


Figura 4. Esquema de generación de vapor.

El esquema de generación de vapor está representado en las Figuras 4 y 5, el mismo, se aproxima al ciclo Rankine.

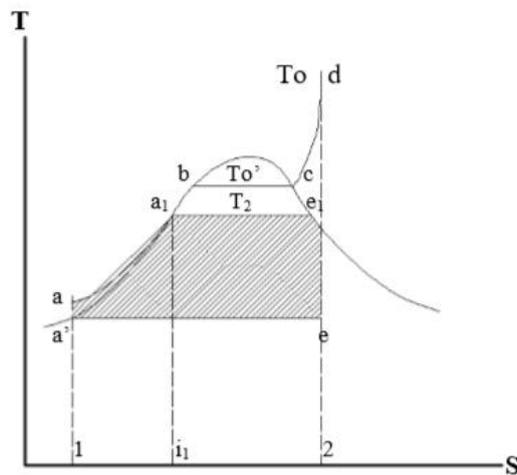


Figura 5. Diagrama TvsS

En el proceso de fabricación de azúcar, en un central azucarero bien balanceado energéticamente, el residuo leñoso resultante es suficiente para generar la energía requerida en las necesidades tecnológicas de potencia y calor del proceso, y aportar, además electricidad adicional al Sistema Electroenergético Nacional. Es por este hecho, con relación a otros procesos;

cuya función principal es el aporte de electricidad; que los centrales azucareros presentan una mayor eficiencia en el uso global de la energía, puesto que además de entregar la cantidad suficiente que demandan los aparatos tecnológicos, garantiza por medio de la energía remanente en el vapor de escape el abastecimiento de esta a los equipos de transferencia de calor implícitos en el diagrama de producción.

Diferentes estudios han demostrado que un central azucarero puede autoabastecerse de energía a partir del bagazo y obtener sobrantes de este, que pueden ser de hasta el 30 % del total producido por lo que existe una posibilidad real de explotar las potencialidades energéticas de estos para disminuir el consumo de combustibles y de esta manera minimizarlos costos de producción por este concepto, respecto a los cuales pueden representar en un proceso industrial de un 15 a un 35% del valor final del producto (Serrano et al., 2017)

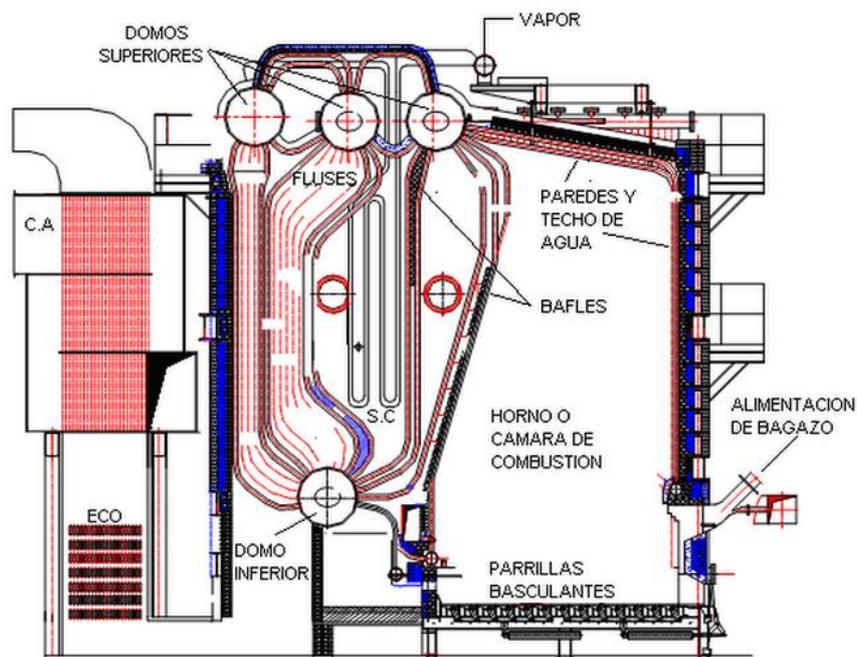


Figura 6. Caldera acuotubular.

1.4- Análisis energético y energético

El término energía se usa para referirse a una fuerza capaz de generar una acción o un trabajo. Así, se entiende por energía a las fuerzas capaces de movilizar, transformar, hacer surgir o mantener funcionando a un objeto.

La exergía de un sistema se define como el máximo trabajo realizable por el conjunto del sistema y un estado de referencia específico (habitualmente el medio ambiente), hasta que el sistema llega al equilibrio con el estado de referencia.

Mientras la energía se conserva para todos los procesos, conforme a la primera ley de la termodinámica, la exergía sólo se conserva en los procesos reversibles, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica. La exergía es una medida de cantidad y calidad, mientras la energía es medida sólo de cantidad.

La exergía se caracteriza por ser conservada sólo cuando todos los procesos realizados entre un sistema y el medio ambiente son reversibles. De tal manera, la exergía es destruida cuando los procesos son irreversibles (Barragán Noriega, 2014).

El análisis energético y exergético son métodos termodinámicos que usando principalmente la conservación de masa y energía junto con la primera y segunda ley de la termodinámica se usa para diseñar y evaluar procesos químicos (Cabrera et al., 2014).

El rendimiento de un sistema energético, desde el punto de vista termodinámico, puede ser evaluado por la primera (energía) y segunda ley (exergía). El balance energético proporciona una interpretación cuantitativa del análisis termodinámico, mientras que el equilibrio ejercitante está asociado a información cualitativa, describiendo el sistema en sus puntos críticos por las irreversibilidades (pérdidas) ocurridas en el proceso. Las eficiencias de la primera y segunda ley de termodinámica pueden ser útiles para un proceso de toma de decisiones: si los resultados ilustran, respectivamente, las condiciones operativas y de diseño de un sistema térmico tras analizar los valores obtenidos para la eficiencia energética y la eficiencia exergética, así como la evaluación de las irreversibilidades presentadas por el sistema, sirven como referencia al comparar diferentes tecnologías (Alves Dias & Perrella Balestieri, 2018).

1.5- Eficiencia energética

Una de las problemáticas del mundo moderno es, sin lugar a dudas la energía, de ella depende el funcionamiento de las fábricas, la obtención de alimentos y

su preparación, la iluminación, climatización de los hogares, el transporte de personas y mercancías (Anoceto Santos , 2017).

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

La eficiencia energética, implica el desarrollo de una actividad productiva o de prestación de servicio, con el máximo de resultados socialmente útiles y con el menor gasto de portadores energéticos posible y la menor contaminación

La gerencia de la eficiencia energética debe tener como objetivo final el logro de la máxima reducción de los consumos energéticos, con la tecnología productiva actual de la empresa y realizar los cambios a tecnologías eficientes en la medida que estos sean rentables, de acuerdo a las posibilidades financieras de cada empresa. Lograr este objetivo de forma continua requiere organizar un sistema de gestión, cambios de hábitos y cultura energética.

1.6- Simulación

La simulación es un acto que consiste en imitar o fingir que se está realizando una acción cuando en realidad no se está llevando a cabo. Una persona o animal simula para cumplir con un objetivo determina. Si bien es cierto que los seres humanos razonan y tienen más do motivos para fingir o simular, los animales de diversas especies llevan en su instinto una capacidad que les permite simular que son parte de un entorno (escondarse) o hacerse los muertos para preservar sus vidas. (Concepto definición, 2019)

1.6.1- Simulación en la ingeniería

La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de períodos largos de tiempo. (Coss , 2005)

Podemos concluir que la simulación no es más que la herramienta que permite analizar, diseñar y evaluar un sistema a través de modelos que contemplen cualitativamente y cuantitativamente las entradas y salidas del sistema.

1.6.2- Importancia de la simulación

La simulación cada vez se vuelve un instrumento necesario en cualquier área de trabajo es por eso se ha enmarcado su importancia ya que, es menos caro y más rápido que construir físicamente el sistema real, se puede descubrir errores de diseño en el modelo en lugar de hacerlo en el sistema real, es un instrumento de estimación y pronóstico, también en base a resultados obtenidos de la simulación podemos tomar decisiones a tiempo, es una estrategia de planeación y la simulación proporciona un control sobre el tiempo, debido a que es un fenómeno que se puede acelerar o retardar según se desee.

El incluir métodos y técnicas de simulación en un proceso, sistema o procedimiento, asegura un análisis mucho más conveniente tanto en consumo de recursos físicos como de logística; además de que se consiguen resultados confiables con un margen de error mínimo y evitando pérdidas producto de una planificación sin bases de conocimiento.

1.6.3- Aplicación

Las áreas de aplicación de la simulación son muy amplias y entre ellas están el análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes, el análisis y diseño de sistemas de manufactura y sistemas de comunicaciones, evaluación del diseño de organismos prestadores de servicios públicos (por ejemplo: hospitales, oficinas de correos, telégrafos, casas de cambio etc.), el análisis de sistemas de transporte (terrestre, marítimo o por aire), de grandes equipos de cómputo, del departamento de producción de una fábrica y el análisis financiero de sistemas económicos. También están el adiestramiento de operadores industriales, la planeación para la producción en industrias alimenticias y la evaluación de sistemas tácticos o de defensa militar.

1.6.4- Fases de la simulación

En la figura 7, se visualiza las fases o etapas de simulación, donde se resaltan las interacciones entre los procesos principales: desarrollo del modelo, ejecución del modelo y análisis de salida del modelo. (Cabrera Hernández, CasasLedón, de la Cruz Péré, & Arteaga Pérez, 2014)

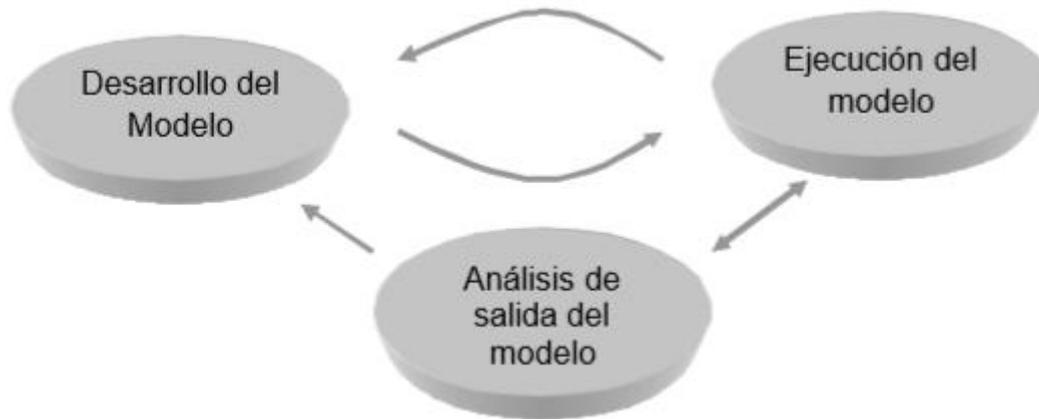


Figura 7. Fases de la simulación.

1.6.5- Software utilizados para la simulación de sistemas

Estos softwares son simuladores dedicados fundamentalmente a la industria con el objetivo de mejorar e incrementar la eficiencia de las mismas a permitir hacer simulaciones de diferentes procesos antes de que ocurran en realidad, las cuales producen resultados que pueden ser analizados para una futura realización de los mismos. Existe una gran variedad de simuladores de procesos comerciales, algunos de las cuales son poderosas herramientas de cálculo, con inmensos bancos de datos que contienen las propiedades físicas de miles de compuestos y sustancias químicas, selección de modelos termodinámicos, cálculos de equipos (teórico y real), análisis de costo, estado de agregación y condiciones de operación, que le dan al simulador la ventaja de una gran versatilidad. (Ramírez, 2014)

Entre los más usados están:

- **HYSYS:** Es un programa interactivo enfocado a la ingeniería de procesos y la simulación, que se puede utilizar para solucionar toda clase de problemas relacionados con procesos químicos. Este simulador como se muestra en la Figura 8, cuenta con una interfaz muy amigable para el usuario, además de permitir el empleo de operadores lógicos y

herramientas que facilitan la simulación de diversos procesos. Es un simulador bidireccional, ya que el flujo de información va en dos direcciones (hacia delante y hacia atrás). De esta forma, puede calcular las condiciones de una corriente de entrada a una operación a partir de las correspondientes a la corriente de salida sin necesidad de cálculos iterativos. Posee un entorno de simulación modular tanto para estado estacionario como para régimen dinámico. Es un software para la simulación de plantas petroquímicas y afines.

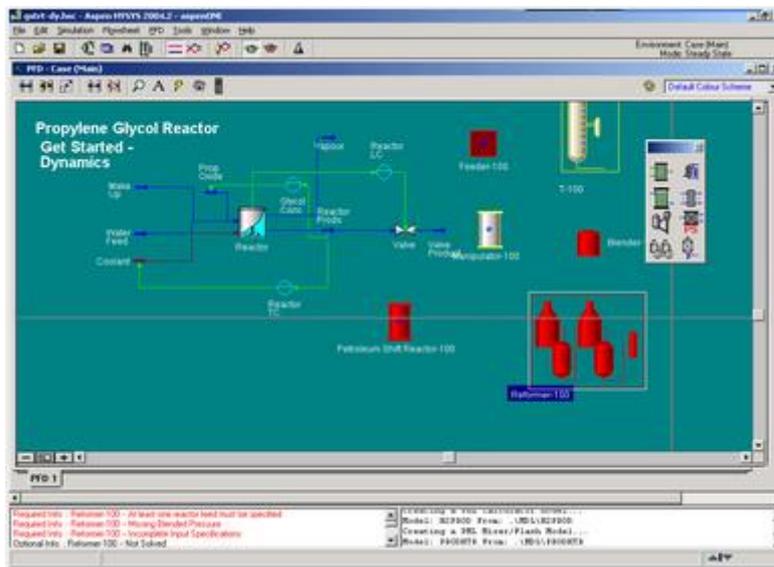


Figura 8. Ambiente de simulación de Hysys.

- **AspenPlus:** El Sistema Avanzado para Ingeniería de Procesos (ASPEN) es un mercado líder en herramientas de modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, especialidades químicas, metales y minerales. Aspen Plus es un simulador estacionario, secuencial modular (en las últimas versiones permite la estrategia orientada a ecuaciones). Actualmente es posible que sea el más extendido en la industria. Se ha utilizado para modelar procesos en industrias: química y petroquímica, refino de petróleo, procesamientos de gas y aceites, generación de energía, metales y minerales, industrias del papel y la pulpa y otros. Aspen Plus tiene la base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de

electrolitos. Además, modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra. Posee herramientas para cálculos de costes y optimizaciones del proceso, generación de resultados en forma gráfica y en tablas y otros.

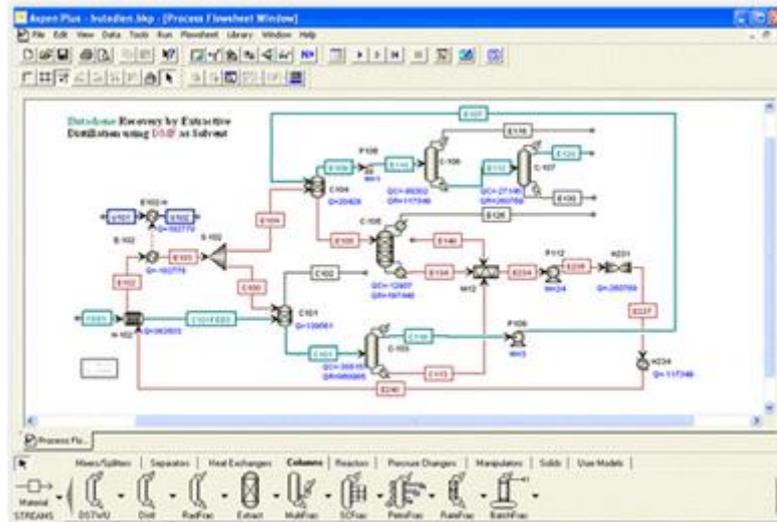


Figura 9. Ambiente de simulación de AspenPlus.

➤ **CHEMCAD:** Es un paquete de módulos que abarca cálculo y diseño de intercambiadores de calor, simulación de destilaciones dinámicas, simulación de reactores por lotes, simulación de destilaciones por lotes, simulación de redes de tuberías. Recientemente ha sido puesta a la venta la versión 6 de CHEMCAD con una nueva interface de usuario y otras propiedades adicionales. Este sistema es muy usado en todo el mundo, para el diseño, operación y mantenimiento de procesos químicos en una gran variedad de industrias incluyendo la exploración de petróleo y gas; y naturalmente en procesos químicos, farmacéuticos, biocombustibles y procesos de fábricas industriales. De forma general este software, como una herramienta de productividad tiene muchas ventajas entre las que cabe mencionar las siguientes:

- ✓ Incremento en la productividad por el uso de información obtenida a partir de la simulación diaria de cálculos relacionados con las condiciones de operación.
- ✓ Maximizar la rentabilidad de las operaciones por el diseño más eficiente de nuevos procesos y equipos.

- ✓ Reducción de costos e inversiones de capital por la optimización y solución de los cuellos de botella existentes en los procesos y en los equipos.

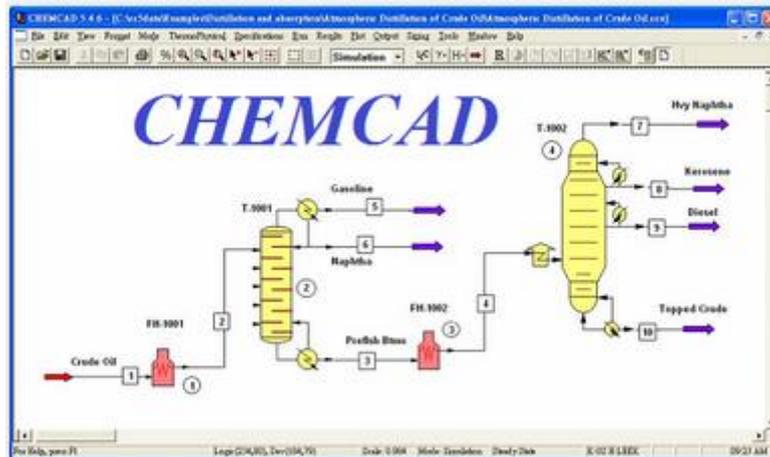


Figura 10. Ambiente de simulación de CHEMCAD.

1.7- Cycle-Tempo

Cycle-Tempo es un software de simulación para el análisis termodinámico y la optimización de los sistemas de conversión de energía. Es adecuado para plantas de energía convencionales, sistemas de refrigeración y refrigeración por compresión, además de sistemas de energía no convencionales como son las plantas de energía solar, los sistemas de tres generaciones, los sistemas de absorción-enfriamiento y refrigeración, las celdas de combustible, las plantas de energía del ciclo de Kalina y las plantas de energía de turbinas scCO₂.

También es uno de los pocos paquetes de software que permite el análisis de exergía. Ha existido durante más de una década y tiene una gran comunidad de usuarios, incluidas las principales compañías de energía, empresas de consultoría e institutos de investigación y desarrollo (ASIMPTOTE, s.f.).

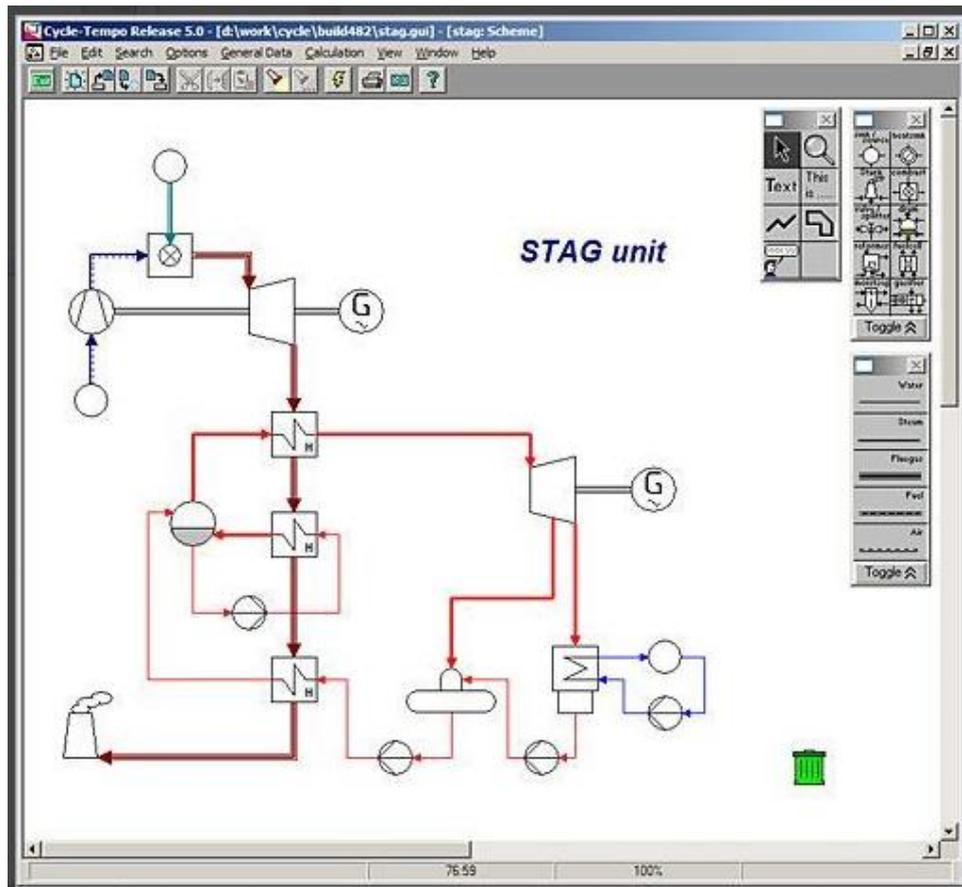


Figura 11. Ambiente de simulación de Cycle-Tempo.

La característica principal de Cycle-Tempo es el cálculo de todos los flujos de masa y energía relevantes en el sistema. Tiene un método computacional particularmente robusto y eficiente, lo que significa que puede confiar en él para obtener rápidamente una solución confiable incluso en la situación más exigente. Las características adicionales permiten un análisis más detallado y la optimización del sistema. Por ejemplo, puede realizar análisis de exergía. Tal análisis proporciona información sobre los flujos y pérdidas de exergía dentro de los subsistemas, y permite comparar cuantitativamente las pérdidas de diferente naturaleza (por ejemplo, dinámica de fluidos contra transferencia de calor). Es una herramienta fundamental cuando se busca la configuración y el rendimiento óptimos del sistema. Además, incluye un optimizador que puede encontrar el valor máximo de un parámetro de mérito (por ejemplo, eficiencia termodinámica o salida de potencia). También permite la integración en tiempo real dentro de los sistemas de monitoreo de datos existentes en toda la planta para análisis de rendimiento y resolución de problemas.

Cycle-Tempo permite construir modelos de sistemas de energía rápidamente a partir de una biblioteca de componentes que incluye válvulas, intercambiadores de calor, bombas, compresores, turbinas, etc. Los componentes están conectados por tuberías y conductos. La biblioteca incluye componentes convencionales, pero también módulos y subsistemas innovadores. La incorporación de modelos personalizados también es posible, de modo que incluso puede modelar sistemas con componentes que son completamente nuevos en el mercado y patentados por su empresa. (ASIMPTOTE, s.f.)

La estrecha integración de Cycle-Tempo con la avanzada biblioteca de propiedades termodinámicas FluidProp permite el uso de modelos termodinámicos y de transporte de vanguardia para fluidos puros y mezclas (fluidos de trabajo convencionales y no convencionales) en una amplia gama de condiciones operativas. Presenta un optimizador incorporado que le permite optimizar varios parámetros a la vez. Pero aún más potente es la opción de integrar el núcleo computacional de Cycle-Tempo con marcos de diseño externos. Esto combina el poder de herramientas como Matlab y Nexus con el poder de modelado de Cycle-Tempo. Se puede usar el mismo mecanismo para integrar Cycle-Tempo en los sistemas de monitoreo.

Cycle-Tempo ha sido desarrollado para calcular flujos de masa, variables termodinámicas, equilibrio químico y composiciones de flujos mixtos. Se puede modelar casi cualquier combinación de sistemas existente o prometedora; por lo tanto, Cycle-Tempo es muy adecuado para la evaluación de sistemas integrados complejos que consisten en combinaciones de sistemas y procesos mencionados anteriormente y se considera que es el software adecuado para realizar un análisis energético y exergético.

Capítulo II: Materiales y métodos

2.1- Descripción del área de generación de vapor y energía eléctrica

La función principal del área de generación de vapor, es la producción de vapor de alta presión para ser utilizado en los turbogeneradores que producen el vapor de escape necesario para el proceso tecnológico, así como la electricidad necesaria para el autoabastecimiento. Entran en el proceso: agua tratada y condensada, que cambian su estado para convertirse en vapor directo. El calentamiento se genera en los hornos, usando como combustible fundamental, el propio bagazo proveniente de la planta moledora. De la disponibilidad y estabilidad del vapor depende el éxito de cualquier sistema de evaporación y cocción de masas cocidas.

En esta etapa existen dos calderas RETAL acuatubular de 45 ton/h, con una presión de trabajo de 18 kg/cm², la temperatura del vapor es de 320 °C como promedio, están provistas de un economizador, calentador de aire y un sobrecalentador, existen dos bombas de agua alimentar. El área está compuesta por tres rastrillos y un conductor de banda, además de una casa de bagazo. El vapor directo es entregado a la planta eléctrica.

En el área de planta eléctrica se logra la conversión de energía calorífica en mecánica, mediante turbinas de vapor acopladas a un generador de electricidad para producir energía eléctrica, no solo para el abastecimiento del ingenio sino también para incorporar al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La electricidad se emplea para el funcionamiento de los motores eléctricos y otros usos de esta energía, y el vapor de escape para el proceso de fabricación en los equipos que demandan calor.

El éxito del balance energético de la fábrica de azúcar consiste precisamente en generar la energía necesaria a partir del valor energético del bagazo y el aprovechamiento del agua que se extrae en el propio proceso para alimentar las calderas. De esta forma se optimiza el consumo de agua y combustible. Es importante mantener estricto control en los parámetros establecidos en el proceso de cristalización para que el consumo de vapor no se exceda.

En esta etapa existen tres turbogeneradores alemanes de 1,5 MW, la capacidad total instalada es de 4,5 MW. Nominalmente los turbogeneradores

trabajan a 18 kg/cm^2 con 310°C de temperatura en el vapor directo y $1,266 \text{ kg/cm}^2$ de escape.

2.2 Metodología de trabajo con el software Cycle-Tempo

Para comenzar a simular se debe ejecutar el software y crear un ambiente de simulación en blanco como se muestra en la figura 12.

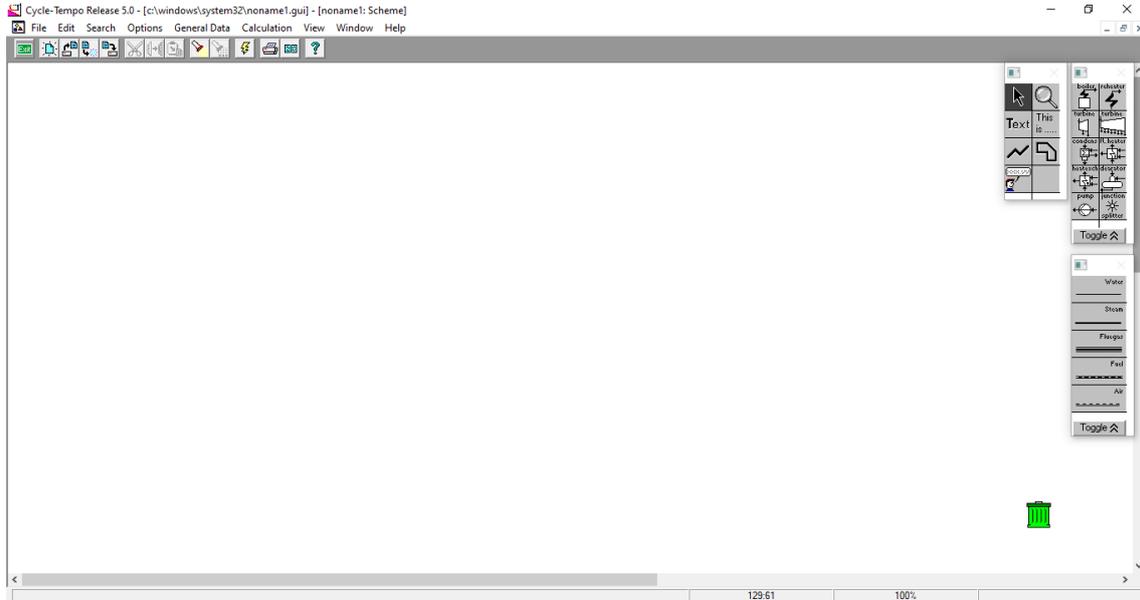


Figura 12 Ambiente de simulación en blanco de Cycle-Tempo.

Antes de añadir alguna corriente es necesario agregar los equipos ya que a diferencia de Hysys no pueden simularse por sí solas. Para los puntos donde exista mezcla o división de corrientes, así como entradas de las mismas que no provengan de otro equipo se utilizan los nodos (figura 13) que hacen la función de mezcladores y divisores. Cada equipo tiene una ventana emergente que aparece al dar doble clic sobre ellos. Los otros equipos usados en la simulación son las turbinas (figura 14), generadores (figura 15) y la válvula de expansión (figura 16).

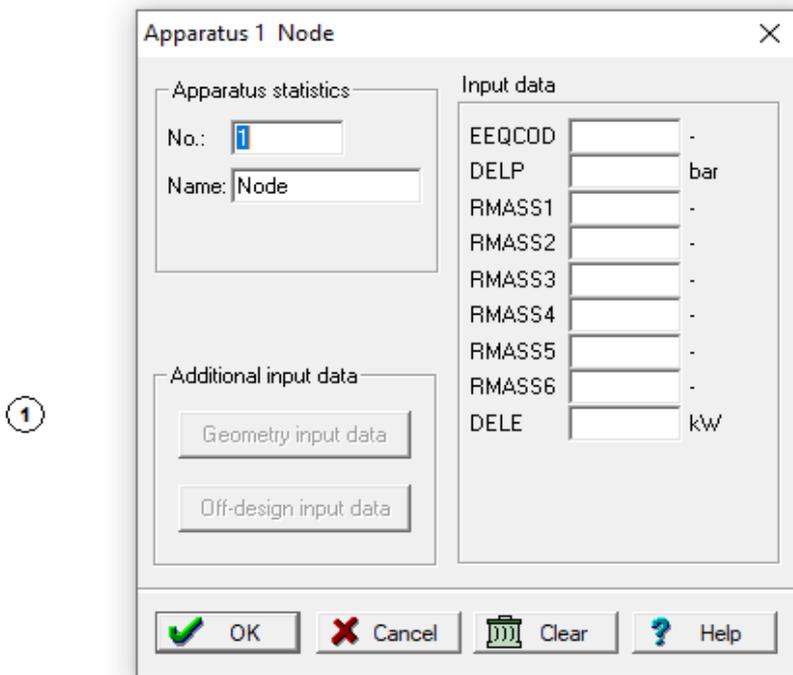


Figura 13. Nodo y su ventana de datos.

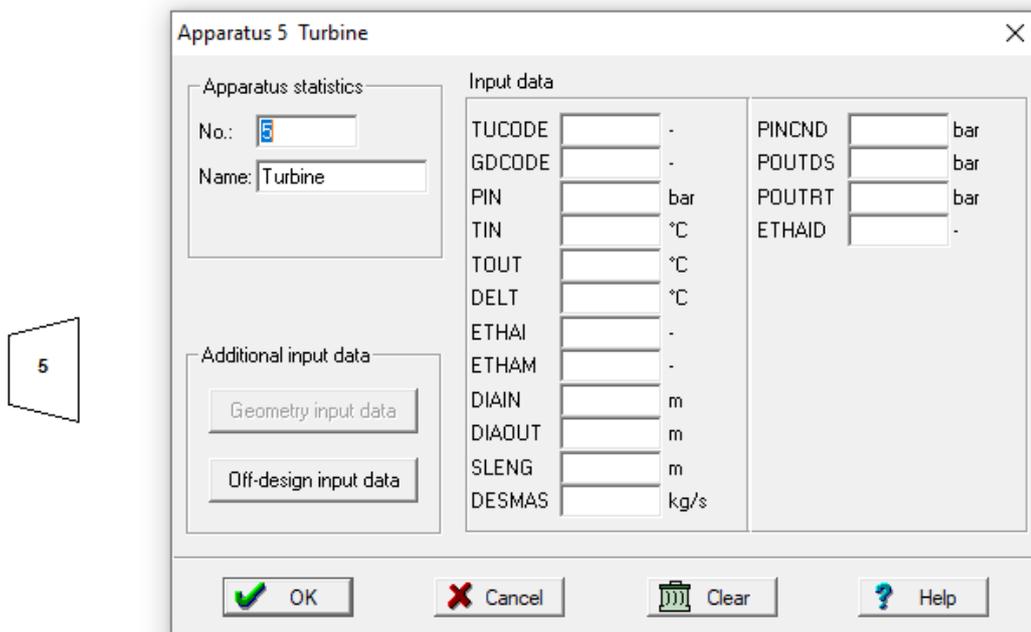


Figura 14. Turbina y su ventana de datos.

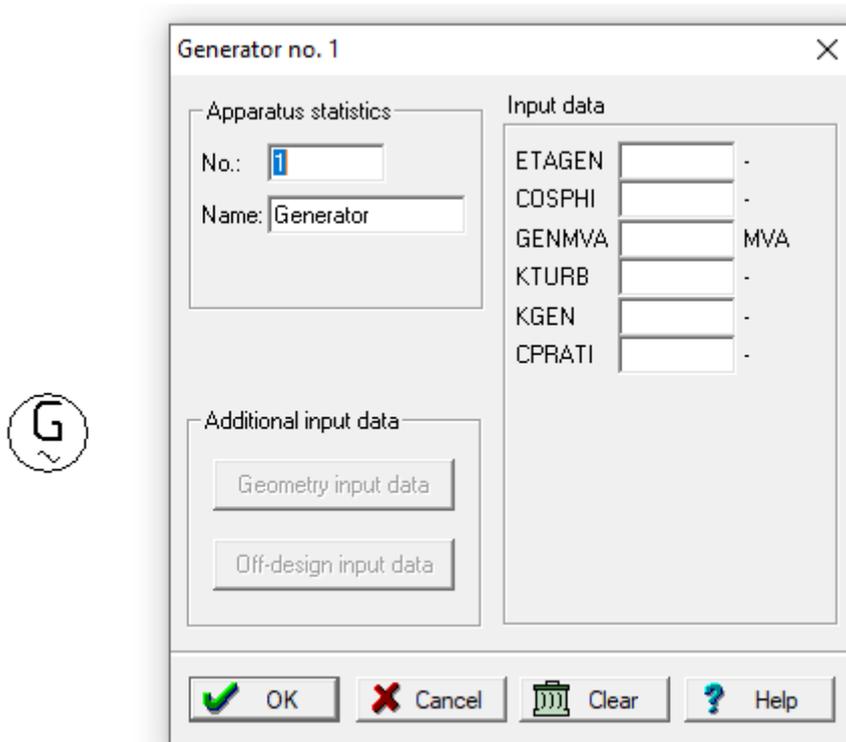


Figura 15. Generador y su ventana de datos.

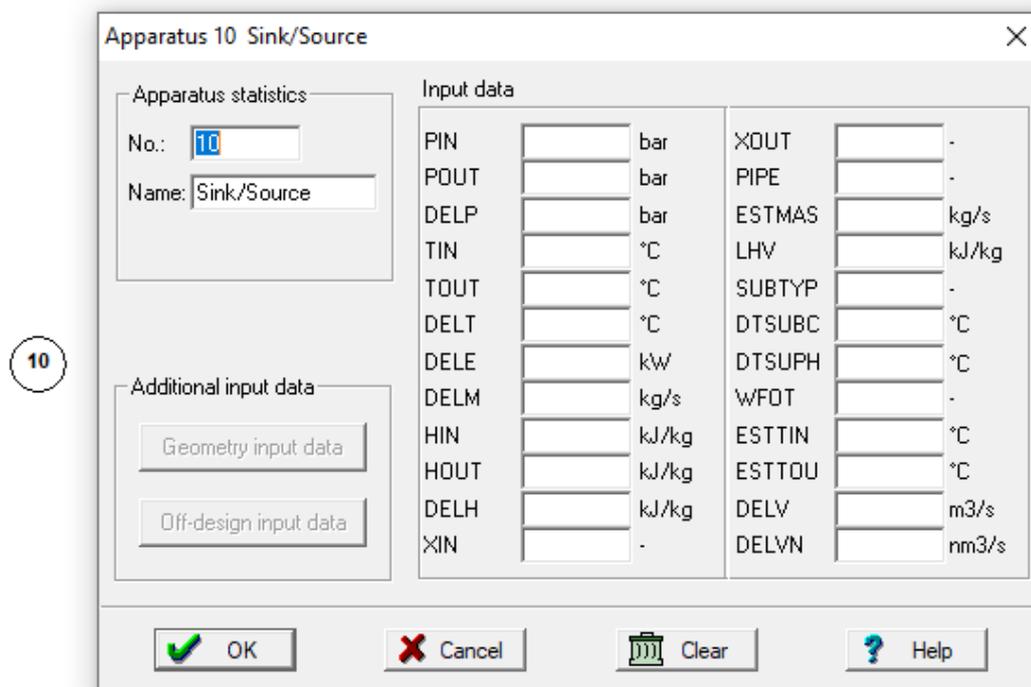


Figura 16. Válvula de expansión y su ventana de datos.

Cundo se tienen agregados los equipos, se comienza a conectarlos mediante las corrientes, estas son representadas por líneas que varían su forma y grosor según el fluido que circula por ellas, también se le puede añadir datos, cambiar el tipo de fluido y el color como se muestra en la figura 17.

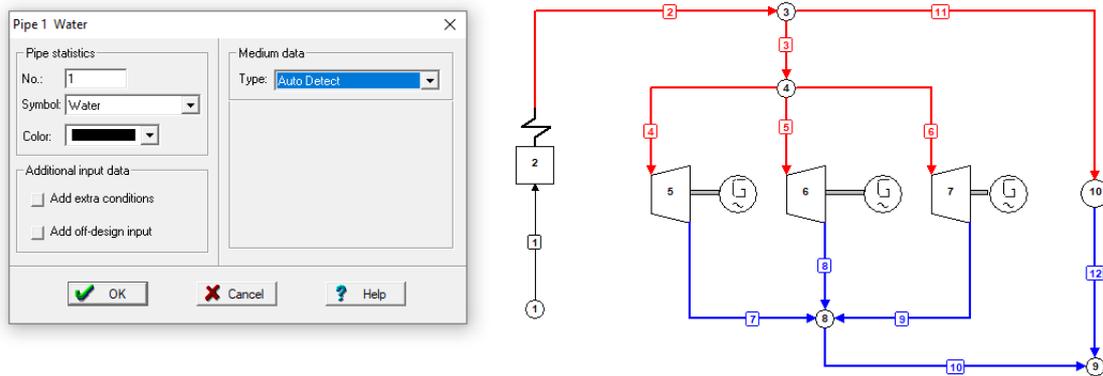


Figura 17. Corrientes y su ventana de datos.

Las turbinas, generadores y electromotores se conectan mediante ejes como se muestra en la figura 18.

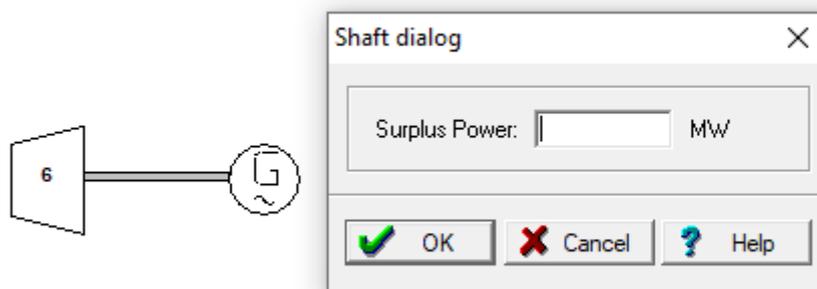


Figura 18. Eje y su ventana de datos.

Al concluir de añadir los equipos y conectarlos queda como se muestra en la figura 19. Debe tenerse en cuenta que los equipos y corrientes toman los valores de quien están conectados por lo que no es necesario insertar los datos siempre y cuando se hayan especificado con anterioridad o posterioridad.

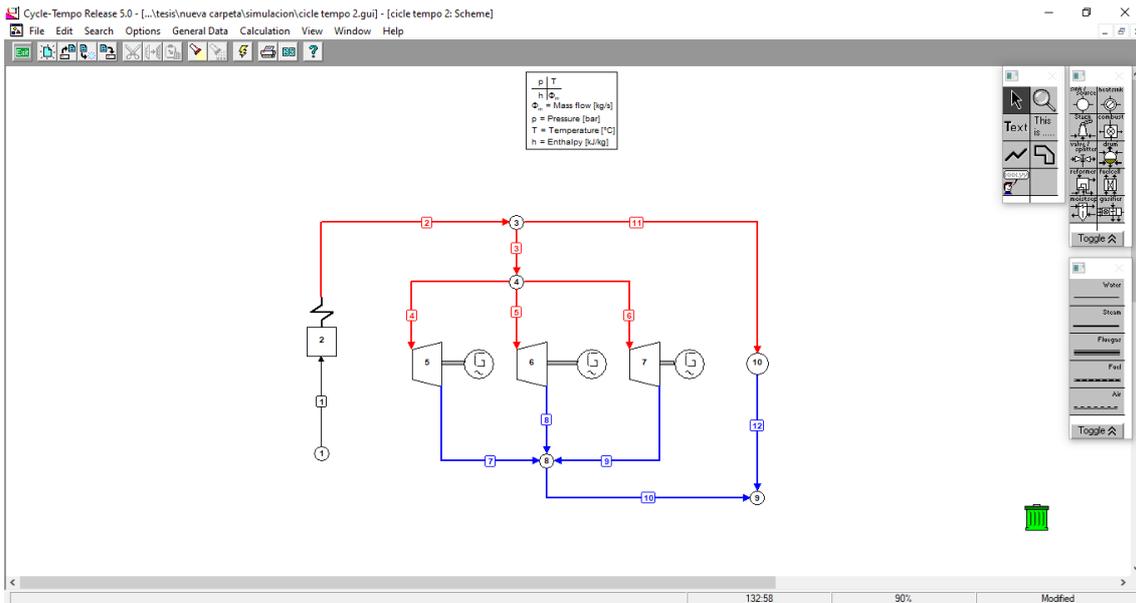


Figura 18. Simulación del esquema de consumo y generación de vapor primario de la UEB Central Azucarero Jesús Rabí.

2.3 Validación del modelo obtenido.

La validación del modelo de simulación se realiza a partir del ajuste al caso base que permite definir la confiabilidad del modelo y un análisis de sensibilidad de respuesta del modelo.

Para hacer el ajuste al caso base, se hace una simulación con las condiciones actuales de operación y se compararan los resultados obtenidos con los datos reales del proceso de separación final de gas natural de la Planta de Procesamiento de Crudo.

El error relativo se calcula por la ecuación 1.

$$\% \text{ error} = 100 \left| \frac{P_{real} - P_{simulado}}{P_{real}} \right| \quad \text{Ec 1}$$

Siendo **P** el parámetro en el que se realiza el análisis comparativo.

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad permite conocer la sensibilidad de respuesta del modelo ante perturbaciones en las variables independientes, tales como condiciones de entrada, parámetros de operación entre otras. Con los resultados obtenidos se construyen gráficos para comprobar cómo se comporta el modelo en la predicción de las respuestas ante las variaciones realizadas.

Conclusiones

- Con el modelo simulado de la generación y consumo primario de vapor en la UEB Jesús Rabí es posible aumentar la eficiencia energética mediante un plan de mejoras.
- El análisis bibliográfico permitió identificar a Cycle-Tempo cómo el software más adecuado para la simulación de esquemas de generación y consumo de vapor.
- El modelo de simulación permite crear diferentes esquemas de generación y consumo de vapor, como casos de estudio.

Bibliografía

- Anoceto Santos , D. (2017). *Alternativa para la exportación de electricidad en la UEB Central Azucarero Héctor Rodríguez a partir de la instalación de una bioeléctrica.* . Santa Clara.
- Alves Dias, R., & Perrella Balestieri, J. A. (2018). Energetic and exergetic analysis in a firewood boiler. *Revista de ciência & tecnologia*, 15-24.
- ASIMPTOTE. (s.f.). Obtenido de <http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/cycle-tempo-details>
- Ayala, A. (2012). *Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña.* . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. .
- Balderrama, r. (28 de Octubre de 2014). *Prezi*. Obtenido de prezi: <https://prezi.com/6-qrmDupqob3/ciclos-de-potencia/>
- Barragán Noriega, D. R. (2014). *Simulación y análisis exergético del proceso de producción dual azúcar etanol caso colombiano.* Bucaramanga.
- Cabrera Hernández, J., Casas Ledón, Y., de la Cruz Pére, L., & Arteaga Pérez, L. E. (2014). Análisis exergético del proceso de producción de azúcar crudo. *Centro Azúcar*.
- Cardona, M. (2009). *Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo Fletcher Smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Concepto definición.* (2019). Obtenido de <https://conceptodefinicion.de/simulacion/>
- Coss , R. (2005). *Simulación: un enfoque práctico.* México: Limusa.
- Doherty, W., & Rackemann, D. (2009). "Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugar cane clarification". *International Sugar Journal*, 448-455.
- Greenwood, J., Rainey, T., & Doherty, W. (2011). "Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions". *Revista Colloid and Interface Science*.

- Herrera, A. (2011). *Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichi S.A.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira .
- Hugot, E. (1986). Handbook of cane sugar engineering. *Elsevier*.
- Kirillin, V. A., Sichev, V. V., & Sheindlin, A. E. (1976). *Termodinámica Técnica*. Moscú: MIR.
- Medina Flores , J. M., Tinajero Campos , J. H., Maeda Sánchez , A., Zavala Bustos , J. A., & Martínez Nolasco, J. J. (2019). Multi objective parametric optimization of Rankine power cycles, using Taguchi experiment desing techniques. *Pistas Educativas*.
- Morales, Y., Kafarov, V., Ruiz, F., & Castillo, E. (2010). Modelamiento de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de caña de azúcar. Etapas; preparación, molienda y clarificación. *Umbral Científico (16)*, pp. 47-59.
- Páez, C. (2013). *Determinación de las condiciones óptimas para la producción de azúcar turbinado en los parámetros color y tamaño de grano en la empresa Ingenio Risaralda S.A.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Pedrosa, R. (1983). *Fabricación de Azúcar Crudo*.
- Pérez, H. (2009). El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Posada, E. (1987). Tecnología de la Producción Azucarera. La Habana, Cuba.
- Ramírez, G. (19 de Febrero de 2014). *Softwares utilizados para la simulación de sistemas*. Obtenido de <http://softwaresdesimulacion.blogspot.com/>
- Rein, P. (2007). Cane Sugar Engineering. Berlin, Germany.
- Renedo, C. J. (s.f.). *TD. T5.-Ciclos de Potencia*. Obtenido de Termodinámica y Mecánica de Fluidos Grados en Ingeniería Marina y Marítima: <http://personales.unican.es/renodoc/index.htm>
- Roche Martínez, L. F., Gil Alfonso, S., Lima Álvarez, C., Macías Delgado, A. J., & Piedra Rivero, J. L. (2017). *Evaluación del proceso de producción de azúcar crudo en la UEB Central Azucarero Jesús Rabí*. Matanzas.
- Sánchez Jiménez, J. J., & otros. (2010). *Cost of the electrical energy obtained by cogeneration in the sugar cane mills. Part I. Methodology*. Guadalajara.

- Serrano Febles, J., Gonzáles Pérez de Medina, L., & Luis Orozco, J. (2017). *Análisis del proceso de producción de azúcar crudo en un central de la provincia de Matanzas*. Matanzas.
- Silgado Correa, K. J. (06 de febrero de 2018). *Thermodynamic analysis of power cycles*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/322963858>
- van der Poel, P., H., S., & T., S. (1998). *Sugar Technology*. Berlín : Beet Sugar Development Foundation. .