

**Universidad Nacional de Ingeniería  
Facultad de Ingeniería Química**



**Modelación y Simulación del Proceso de Producción de Azúcar en  
Casa de Cocimiento de un Ingenio Azucarero.**

**Trabajo de Diploma**

**Presentado por:**

Yahil Nathaly Lanuza Zamora

**Para optar al título de Ingeniero Químico**

**Tutor:**

M.Sc. Sergio Enrique Álvarez García

**Managua, Nicaragua**

**Junio de 2023**

## **Agradecimiento**

Con mucha gratitud primeramente le doy gracias a Dios por otorgarme la sabiduría y las fuerzas necesarias por haber culminado con éxito mi tesis de graduación, con la cual he terminado mi periodo experimental como universitaria.

En segunda instancia expreso mi agradecimiento a mis padres que me apoyaron en todos los 5 años de formación, brindándome su paciencia y sus conocimientos, ya que sin ellos esto no sería posible.

Mi profundo agradecimiento a la Compañía Azucarera por abrir sus puertas y permitirme realizar este trabajo investigativo, al personal por haberme brindado la información necesaria y por haber compartido sus conocimientos.

De igual manera mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería- UNI RUSB y a toda la Facultad de Ingeniería Química, a mi tutor y mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional. Gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, apoyo incondicional y amistad.

## **Dedicatoria**

### **A Dios.**

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado la salud para lograr este objetivo, además de su infinita bondad y amor.

### **A mis padres.**

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor y ejemplos de perseverancia y constante.

### **A mis Maestros.**

Por haberme brindado sus conocimientos y enseñanzas durante todo este trayecto de tiempo, por su apoyo y motivación para la elaboración de esta investigación y a toda la Facultad por darme la oportunidad de graduarme en esta Alma Mater.

## **Resumen**

En el presente estudio, se desarrolló un modelo matemático modelación y la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero, en el cual puede ser utilizado como una herramienta de control del proceso en tiempo real para ajustas las desviaciones que ocurran en las diferentes etapas de la producción de azúcar en casa de cocimiento y en el área de cristalización del ingenio azucarero.

Los resultados obtenidos en este proceso de simulación presentan que al sistema de cocimiento ingresa un flujo másico de jugo de caña de 1173.38 Ton/día que contiene agua y sólidos solubles recuperables, teniendo como productos en su salida 445.88 Tn/día de agua que es evaporada durante la operación de cocimiento, se recuperan 583.61 Tn/día de Azúcar y 143.89 Tn/día de Mielles Finales. Se tiene que, en el sistema de cocimiento, se procesan los siguientes materiales: 777.80 Tn/día de Masa Cocida A, 435.96 Tn/día de Masa Cocida B, 369.68 Tn/día de Masa Cocida C y 261.70 de Mezcla de Cristalización. Se recuperan 581.04 Tn/día de 625.25 Tn/día de Sacarosa que están presentes en la Meladura para una eficiencia teórica de recuperación del 92.87 %. Con una producción de 12,686 qq/día de Azúcar.

En el stock de materiales del área de cristalización se tiene un total de 865.28 Tn de sólidos solubles recuperables, que contienen 742.45 Ton de Azúcar, que corresponden a una producción de 16,371 qq. La eficiencia de recuperación de sacarosa ha sido del 85.80 %. Así mismo se tienen 122.84 Tn de mieles finales, correspondiendo a 14.20 % de sacarosa que no se ha podido recuperar.

En total tanto en proceso como en el stock del área de cristalización se tienen 1592.77 Tn de sólidos solubles recuperables. La eficiencia global de recuperación de Azúcar es del 83.25 %, con 1326.05 Tn, correspondientes a 29,239 qq de azúcar y 266.73 Tn de mieles finales, con 16.75 % de azúcar no recuperable, pero comercializable como Melaza. Con relación a la sacarosa presente en el azúcar se tiene que contiene 1307.40 Ton, que representa una eficiencia global de recuperación de sacarosa de 95.56 % y perdidas de sacarosa en mieles finales de 60.70 Tn de mieles finales que corresponden a un 4.44 %.

**Índice de contenidos**

	<b>Página</b>
<b>Capítulo I: Introducción</b>	1
<b>Capítulo II: Objetivos</b>	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
<b>Capítulo III: Marco Teórico</b>	4
3.1. Ingenio azucarero	4
3.2. Azúcar (Sacarosa).	4
3.3. El proceso de cristalización del azúcar.	4
3.4. Objetivos de la casa de cocimientos.	5
3.5. Esquemas de cocimientos de azúcar.	5
3.6. Pureza	7
3.7. Agotamiento de las mieles en procesos de cocimiento.	7
3.8. Balance de masa en casa de cocimiento	7
3.9. Control y Manejo de la eficiencia en fábrica.	8
3.10. Simulación de procesos químicos	9
3.11. Etapas de desarrollo de software.	15
<b>Capítulo IV: Diseño Metodológico.</b>	16
4.1. Tipo de Investigación:	16
4.2. Determinación del Universo	16
4.3. Metodología para la ejecución de la investigación	16
4.4. Métodos y procedimientos para la realización del estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A.	18
4.4.1. Entrevistas semiestructuradas	18
4.4.2. Observación y Mediciones Directas	19
4.4.3. Aplicación de la técnica de Construcción de diagrama de flujo de proceso.	19
4.5. Métodos y procedimientos para el desarrollo del sistema de simulación para el control de la producción de azúcar en el área de cristalización.	19
4.5.1. Análisis del problema	19
4.5.2. Diseño del algoritmo de resolución del problema:	20
4.5.2.1. Formulación del balance de masa de sólidos en casa de cocimiento.	20
4.6. Procedimientos y criterios de selección de la herramienta computacional para el desarrollo del sistema de simulación, ejecución, prueba y validación de los resultados obtenidos	21
4.7. Instrumentos para recopilar información	21
4.7.1. Trabajo de Gabinete	21
4.7.2. Trabajo de Campo	21

**Índice de contenidos**

	<b>Página</b>
<b>Capítulo V: Etapas operacionales, y componentes del proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.</b>	23
5.1. Estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A, Descripción del proceso de Casa de Cocimiento.	23
5.1.1. Procesos y operaciones del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A.	23
<b>Capítulo VI: Parámetros operacionales que gobiernan los procesos y operaciones de la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.</b>	30
<b>Capítulo VII: Desarrollo del modelo matemático basado en los balances de materia del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur para el proceso de simulación</b>	32
7.1. Balance global de materiales del sistema de cocimiento y cristalización.	32
7.2. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida A	33
7.3. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida B	34
7.4. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida C	35
7.5. Balance de materiales por componente para Mezcla de Cristalización.	36
7.6. Modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur	37
7.7. Método de solución de sistema de ecuaciones simultáneas lineales del Modelo Matemático y Simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.	38
<b>Capítulo VIII: Análisis y discusión de resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en masas y mieles las etapas del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización.</b>	40
8.1. Resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimientos.	40
8.2. Eficiencia teórica del proceso de cristalización	44
8.3. Resultados del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento del área de cristalización	45
8.4. Resultados de la determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.	45
<b>Capitulo IX: Conclusiones</b>	48
<b>Capitulo X: Recomendaciones</b>	50
<b>Capitulo XI. Bibliografía</b>	51

**Índice de Figuras**

	<b>Página</b>
Figura 3.1. Aplicación del Método de la Cruz de Cobenze, para cálculos de balance de masa y del stock en la casa de cocimiento.	8
Figura 3.2. Relaciones entre los elementos de un proceso de simulación	10
Figura 4.1. Balance de masa en la unidad de proceso – Casa de Cocimiento. Área de Cristalización .	20
Figura 5.1. Sistema moderno de tres masas cocidas con doble magma.	24
Figura 5.2. Tacho Tipo Calandra.	27
Figura 5.3. Tuberías de alimentación a los tachos Marimba.	27
Figura 7.1. Componentes de la unidad de procesos en casa de cocimiento y flujos de trabajo.	32
Figura 7.2. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida A	33
Figura 7.3. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida B	34
Figura 7.4. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida C	35
Figura 7.5. Balance de materiales por componente para Mezcla de Cristalización.	36
Figura 7.6. Matriz de Interacción de Solver en Excel para resolver el sistema de ecuaciones del Modelo Matemático y Simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.	39
Figura 8.1. Matriz de interacción para resolver el sistema de ecuaciones del modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento con el Complemento Solver de Excel.	41
Figura 8.2. Balance de masa en la unidad de proceso – Casa de Cocimiento. Área de Cristalización.	42

**Índice de Tablas**

	<b>Página</b>
Tabla 3.1. Enfoque modular secuencial de simulación	14
Tabla 5.1. Estructura y función de los Tachos en la casa de Cocimiento.	26
Tabla 8.1. Datos Iniciales para simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento	40
Tabla 8.2. Resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.	40
Tabla 8.3. Balance de masas de sólidos solubles recuperados en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.	41
Tabla 8.4. Balance de masas de sacarosa recuperada en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.	43
Tabla 8.5. Resultados del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento del área de cristalización	45
Tabla 8.6. Resultados de la determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.	46
Tabla 8.7. Eficiencias globales de recuperación de azúcar y sacarosa el proceso de producción en casa de cocimiento y en el stock de materiales del área de cristalización.	47

## **Capítulo I: Introducción**

La Compañía Azucarera se encuentra ubicada en el Departamento de Rivas, Nicaragua. Su principal actividad es la producción de azúcar, melaza y energía para el abastecimiento del gasto energético de la empresa. La visión de La Empresa es ser una agroindustria de caña de azúcar, con el fin permanente de obtener la máxima sostenibilidad financiera, ambiental y social; y con la misión de producir esta azúcar de manera óptima, garantizando la calidad del producto.

Su producto principal es el azúcar para consumo y para garantizar su calidad, es necesario el trabajo en conjunto de todas las áreas de proceso de la empresa, teniendo gran responsabilidad en la calidad el departamento de fabricación, el cual tiene por objeto elevar la producción de azúcar; mejorando la eficiencia del proceso, garantizando siempre bajos costos de producción y alta calidad del producto, aumentando la rentabilidad de la empresa, siendo esta la meta propuesta por dicha área.

Sin embargo, se tiene la dificultad de realizar evaluaciones del desarrollo de la producción en sus diferentes procesos y operaciones en tiempo real, de tal forma que le permita corregir y ajustar el proceso de cocción y cristalización, de acuerdo con los requerimientos y planes de producción de la empresa. Así mismo, la dirección del área de cocción y cristalización necesita conocer, la existencia de volúmenes de producción de azúcar tanto durante el proceso de cocción, como en el stock en tiempo real.

Por tal razón se desarrolló un modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento basado en el balance de masas en estado estacionario y su subsecuente simulación en tiempo real para el control de la producción de azúcar en el área de cristalización y en el almacén de la Compañía Azucarera. De tal manera, que esta herramienta contribuya a establecer un sistema de planificación de la producción y de control de las operaciones y funcionamiento del área de cocción y cristalización para optimizar su rendimiento y eficiencia. Este estudio ha abarcado también el stock del área de cristalización que es la cantidad de azúcar que existen en los materiales - mieles, magmas, semillas - presentes en el proceso de cristalización.

El desarrollo del modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y su aplicación en el proceso de simulación, ha tenido como objetivo adicional lograr que las áreas de laboratorio y fabricación trabajen coordinadamente, de tal forma que los resultados obtenidos en ambas áreas se utilicen como insumos en la toma de decisiones orientadas a mejorar y corregir fallas detectadas en el proceso de fabricación en tiempo real, con el fin de obtener mayor calidad del producto terminado, y por ende el aumento de la rentabilidad a la empresa.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

Los resultados principales del proceso de simulación presentan que al sistema de cocimiento ingresa un flujo másico de jugo de caña de 1173.38 Ton/día, de los cuales 445.88 Tn/día corresponden a agua que es evaporada durante la operación de cocimiento, se recuperan 583.61 Tn/día de Azúcar y 143.89 Tn/día de Mielles Finales. Se recuperan 581.04 Tn/día de 625.65 Tn/día de Sacarosa de 625.65 Tn/día que están presentes en la Meladura para una eficiencia teórica de recuperación del 92.87 %. Con una producción de 12,686 qq/día de Azúcar.

En el stock de materiales del área de cristalización se tiene un total de 865.28 Tn de sólidos solubles recuperables, que contienen 742.45 Ton de Azúcar, que corresponden a una producción de 16,371 qq. La eficiencia de recuperación de Sacarosa es del 85.80 %. Se tienen además 122.84 Tn de mieles finales, correspondiendo a 14.20 % de Sacarosa que no se ha podido recuperar.

En total tanto en proceso como en el stock del área de cristalización se tienen 1592.77 Tn de sólidos solubles recuperables. La eficiencia global de recuperación de Azúcar es del 83.25 %, con 1326.05 Tn, correspondientes a 29,239 qq de azúcar y 266.73 Tn de mieles finales, con 16.75 % de azúcar no recuperable, pero comercializable como Melaza. Con relación a la sacarosa presente en el azúcar se tiene que contiene 1307.40 Ton, que representa una eficiencia global de recuperación de sacarosa de 95.56 % y pérdidas de sacarosa en mieles finales de 60.70 Tn de mieles finales que corresponden a un 4.44 %.

## **Capítulo II: Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Desarrollar un modelo matemático para simular el proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización en una Compañía Azucarera, basado en la recuperación de sólidos en azúcar y miel final.

### **2.2. Objetivos Específicos**

1. Establecer las etapas operacionales, y los componentes que integran el proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.
2. Determinar las variables físico- químicas y propiedades de estados con sus correspondientes valores operacionales que rigen y controlan cada etapa del proceso de cocción y cristalización.
3. Desarrollar el modelo matemático basado en los balances de materia del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y Cristalización en la Compañía Azucarera del Sur para el proceso de simulación
4. Simular el proceso de producción de azúcar en masas y mieles de cada etapa del proceso de cocción y cristalización en la fabricación de azúcar, estableciendo su eficiencia con relación a la recuperación de sólidos en azúcar y miel final y azúcar en stock.

## **Capítulo III: Marco Teórico**

### **3.1. Ingenio azucarero**

La Real Academia de la Lengua Española los define como: “El conjunto de aparatos para moler la caña y obtener el azúcar, finca que contiene el cañamelar y las oficinas de beneficio”.

El ingenio o central azucarero, es una empresa mercantil clasificada como agroindustrial, cuya actividad es primordialmente la de convertir su materia prima que es la caña de azúcar en un producto final que principalmente es el azúcar, sin embargo, también se obtienen en menor cantidad, de otros productos similares, tales como la remolacha.

### **3.2. Azúcar (Sacarosa).**

Se denomina azúcar, en el uso más extendido de la palabra, a la sacarosa, cuya fórmula química es  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , también llamada «azúcar común» o «azúcar de mesa». La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha.

La sacarosa se encuentra en todas las plantas, y en cantidades apreciables en otras plantas distintas de la caña de azúcar o la remolacha, como el sorgo y el arce azucarero. En ámbitos industriales se usa la palabra azúcar o azúcares para designar los diferentes monosacáridos y disacáridos, que generalmente tienen sabor dulce, aunque por extensión se refiere a todos los hidratos de carbono.

El azúcar es una importante fuente de calorías en la dieta alimenticia moderna, pero es frecuentemente asociada a calorías vacías, debido a la completa ausencia de vitaminas y minerales. (Weininger, 1998)

### **3.3. El proceso de cristalización del azúcar.**

La cristalización en las fábricas se produce bajo vacío e involucra procesos simultáneos de transferencia de masa y evaporación. El vacío es necesario para mantener la temperatura a un nivel suficientemente bajo que permita minimizar la formación de color y la inversión o degradación de sacarosa en el proceso. Al iniciar un cocimiento discontinuo, el licor se concentra hasta alcanzar la zona metaestable en la curva solubilidad azúcar- agua. La cristalización se inicia adicionando semillas muy finas en forma de suspensión, las cuales proporcionan sitios de nucleación para comenzar la cristalización. A partir de entonces la concentración del licor madre se controla de manera que la cristalización ocurra sin disolver ningún cristal y sin formación de nuevos núcleos (falso grano). Para esto se requiere establecer suficiente área superficial de cristales y regular la alimentación del tacho para controlar la concentración del licor madre tradicionalmente este proceso se ha efectuado empleando tachos discontinuos, pero recientemente se han introducido sistemas continuos. Sin embargo, la etapa inicial de cristalización se realiza aún de manera discontinua. En algunas ocasiones el proceso comienza

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

partiendo de un magma o pie de templa, es decir una mezcla de licor y cristales de un cocimiento previo, evitando así el proceso de semillamiento.

### **3.4. Objetivos de la casa de cocimientos.**

El proceso de cristalización en una fábrica de azúcar crudo debe cristalizar tanto azúcar como sea posible de la meladura proveniente de los evaporadores. El azúcar tiene que ser producido con la calidad requerida y el contenido de azúcar en miel final debe ser tan bajo como sea posible, dado que cualquier azúcar remanente en estas mieles es una pérdida operacional. La cristalización se debe realizar en varias etapas para lograr reducir aceptablemente el contenido de sacarosa en miel final.

Las operaciones necesitan también ser conducidas de manera que se cumplan las metas de producción. Esto requiere alcanzar ciertas metas de eficiencia de cristalización, de manera que los equipos instalados no constituyan cuellos de botella. Al mismo tiempo se debe tener cuidado para asegurar que la cantidad de vapor utilizado en el proceso no resulte excesiva. Generalmente una cristalización eficiente minimiza el consumo de vapor.

La calidad del azúcar es afectada por la calidad de la meladura a procesar, específicamente por su pureza, color y turbiedad. El esquema de cristalización se debe seleccionar para alcanzar la calidad requerida a partir de la meladura a ser procesada. El esquema óptimo es aquel que permite satisfacer la calidad deseada con una mínima capacidad de equipos instalada.

Obtener una eficiencia de cristalización elevada implica la producción de la máxima cantidad de cristales de azúcar en cada etapa de cristalización. Un agotamiento elevado en cada etapa minimiza la cantidad de masa cocida a ser procesada, lo cual a su vez minimiza el uso de vapor y la capacidad requerida en tachos y centrifugas. (Rein, 2007).

### **3.5. Esquemas de cocimientos de azúcar.**

La máxima recuperación de la sacarosa por cristalización no puede lograrse en una sola etapa. Existe cierto límite del contenido de cristales que se encuentra en el punto donde la masa cocida no puede fluir fuera del tacho. La cristalización se debe detener antes de alcanzar este punto y la masa cocida debe centrifugarse para separar los cristales de la miel. Las mieles producidas contienen aún azúcar cristalizable y el proceso se repite, usualmente en una o dos etapas adicionales para lograr un recobrado óptimo de sacarosa. La pureza de la masa cocida decrece sucesivamente con cada etapa, a medida que se remueve mayor cantidad de sacarosa. Varios esquemas de cristalización pueden ser utilizados para satisfacer la calidad de azúcar a ser producida de acuerdo con la pureza de la meladura. (Rein, 2007).

**i.- Esquemas de dos cocimientos.** La principal ventaja de los esquemas de cristalización de dos etapas de cocimiento, está en la simplificación de la estación requerida al eliminarse la etapa B. No obstante, este esquema no afecta apreciablemente el volumen total de masa cocida a ser procesada, y por tanto tampoco la capacidad requerida de los equipos en la estación de conocimientos. La miel A se utiliza como jarabe de alimentación para la masa cocida C. La masa cocida C se centrifuga en máquinas continuas y el azúcar C

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

se hace magma con una pureza de aproximadamente 85. El azúcar A se cristaliza a partir de meladura utilizando al magma C como semilla. La masa A debe ser agotada en su totalidad en los tachos y en los cristalizadores por enfriamiento para obtener una caída de pureza de al menos 20 puntos entre masa cocida y miel de purga de primera.

**ii.- Esquema de tres cocimientos.** Es el más comúnmente empleado, consta de tres etapas de cristalización, donde se obtienen azúcares A y B para la comercialización. El azúcar A se cristaliza a partir de meladura utilizando como semilla un magma que consiste de azúcar C en agua (o jugo clarificado) con pureza alrededor de 85. La masa cocida A, se centrifuga para obtener un azúcar A con Pol relativamente alto (98-99 °Z) y miel A con una pureza alrededor de 20 unidades por debajo de la pureza de la meladura. El azúcar B se cristaliza a partir de mieles A (pureza 60-70) y meladura, utilizando como semilla el mismo magma de azúcar C para iniciar la masa cocida B. La masa B se centrifuga utilizando maquinas discontinuas, obteniendo azúcar B con Pol entre 97-98 °Z que se mezcla con el azúcar A para ser despachados de la fábrica. El pie de templa para la semilla C consiste de una mezcla entre miel A y meladura con pureza alrededor de 70 o sencillamente miel A con pureza entre 60 y 70. Los cocimientos de masa C se alimentan con miel B. La masa cocida C es centrifugada usando maquinas continuas para obtener azúcar C y miel final. El azúcar C, con pureza alrededor de 85, es mezclado para formar el magma que se utiliza como semilla para las etapas de cristalización A y B. La pureza de la masa cocida B es mayor que la pureza de la miel A debido en parte a la influencia del semillamiento con magma C, pero también a la adición de meladura a la masa B para reducir la viscosidad. La pureza debe mantenerse en el rango de 70-75 para obtener azúcar B alrededor de 98 °Z, con cristales relativamente grandes y una capacidad aceptable en las centrifugas discontinuas. La alta pureza de las masas cocidas B lleva a una pureza relativamente elevada de la miel de purga de segunda, lo cual a su vez incrementa la pureza de la masa cocida C y la pureza de las mieles finales. Esta es la principal desventaja de este esquema.

**iii.-Esquema doble Einwurf:** Este se conoce en algunas ocasiones como el esquema de "doble magma" o esquema CBA. El esquema tiene tres etapas de cristalización y utiliza azúcar C como semilla para el azúcar B de la masa cocida B, y al azúcar B como semilla para el azúcar A de la masa cocida A. El azúcar producido para la venta es de un solo grado. La preparación del azúcar C es igual que en el sistema de tres cocimientos y la masa C se centrifuga en máquinas continuas. El azúcar C se mezcla con agua o jugo clarificado para hacer magma que se utiliza como semilla para el azúcar B. El azúcar B se cristaliza alimentando mieles A y se centrifuga en máquinas continuas. Con el azúcar B también se hace un magma B. El azúcar A se cristaliza alimentando meladura y usando como semilla magma B, para ser luego centrifugada en máquinas discontinuas

**iv.- Esquema VHP.** Es una modificación del esquema de tres etapas de cocimiento, se usa para la producción de azúcar de muy alta polarización (VHP), entre 99.3 y 99.5 V. Es también el esquema utilizado para producir azúcar blanco directo o de plantación. Todo el azúcar C es disuelto en agua o

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

jugo clasificado y retornado al tanque de meladura como refundido. El azúcar C tiene pureza de 81-85 y se obtiene utilizando máquinas centrifugas continuas. El azúcar B se produce semillando una mezcla de mieles A y B (o meladura si es necesario) con pureza entre 60-70 y alimentando al cocimiento con miel A. La masa cocida B se centrifuga usando máquinas continuas para obtener un azúcar de pureza alrededor de 90 a 92, con la cual se hace magma que será utilizado como semilla para la etapa A de cristalización. Cualquier exceso de azúcar B se disuelve y retorna al tanque de meladura como refundido.

### **3.6. Pureza**

Todos los procesos que toman parte en el cocimiento del azúcar se basan en el contenido de pureza como un criterio para identificar el agotamiento de las mieles (García Lopez & Clark, 1970). Aunque se considera que este no es el mejor criterio, ya que una miel con una pureza de 36 puede estar bien agotada, mientras que otra de 33 puede ser el resultado de un trabajo defectuoso y podría haberse reducido fácilmente a 30. Sin embargo, a falta de un mejor criterio absoluto, se adoptará provisionalmente éste.

El proceso de cocimiento se inicia con meladura cuyas purzas oscilan entre 80 y 85, y generalmente se termina, en las fábricas de azúcar de caña, con mieles finales cuyas purzas aparentes son aproximadamente: Agotamiento Malo: 40, Agotamiento Mediocre: 34, Agotamiento Bueno: 31, Agotamiento Excelente: 28

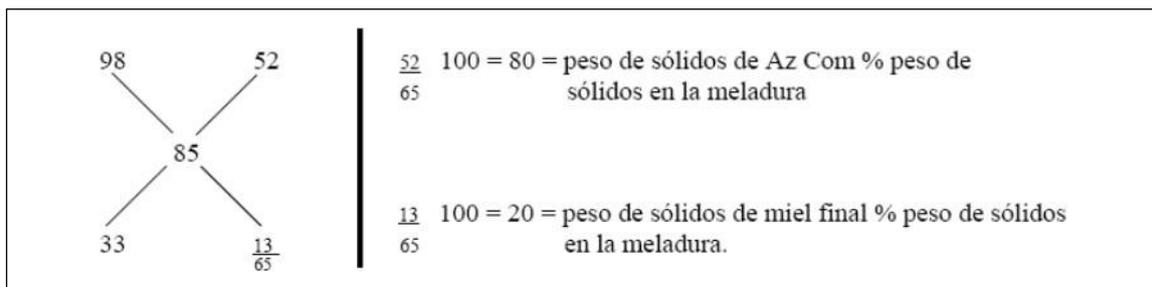
### **3.7 Agotamiento de las mieles en procesos de cristalización o cocimiento.**

El término significa "La propiedad de las mieles que implica la posibilidad de recuperar azúcar de ellas". Es un término útil y facilita las discusiones de este problema. No existe un criterio absoluto que indique si las mieles están realmente agotadas, para lograr mieles de bajas purzas lo primero que hay que realizar es un buen trabajo de cristalización y de templar en los tachos de agotamiento. (Diaz, 2012)

### **3.8.-Balance de masa en casa de cocimiento**

Debido a la complejidad del proceso en toda casa de cocimiento, la implementación del método de Cruz de Cobenze (Ver Figura 3.1), es muy útil para realizar cálculos del balance de masa y del stock en casa de cocimiento, ya que facilita calcular los porcentajes de los materiales de distintas purzas que se deben mezclar para obtener una mezcla de una pureza determinada. Este método se puede usar con todas las mezclas y facilita la solución de muchos problemas que de otro modo serían muy complicados de resolver. Si se proporcionan tres números cualesquiera de los utilizados en el diagrama, los otros dos se determinan fácilmente, ya que genera un sistema de dos ecuaciones de primer grado con dos incógnitas, las cuales se resuelven ya sea por método analítico o numérico. (Lopez Garcia & J.a, 1969).

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**



**Figura 3.1.- Aplicación del Método de la Cruz de Cobenze, para cálculos de balance de masa y del stock en la casa de cocimiento.**

**3.9.- Control y Manejo de la eficiencia en fábrica.**

La eficiencia en fabrica puede ser determinada de diferentes formas, por tanto es importante iniciar definiendo como medir la eficiencia y que formas simplifican no solo el cálculo sino el entendimiento del personal dentro de la empresa. En forma global la eficiencia puede ser entendida como la resultante de un rendimiento real producido, que comparado con el rendimiento teórico, genera un valor de eficiencia que permite además determinar las perdidas industriales totales y establecer un remanente (diferencia entre ambos rendimientos), que es utilizado en muchos casos como un indicador de que tan eficiente es un Ingenio. Más a lo interno de cada etapa del proceso, es posible establecer la eficiencia de extracción en molinos y la recuperación en la casa de cocimientos. El Método de recuperación de sólidos, permite determinar en forma simple los resultados de eficiencia de la fábrica, también permite transmitir esta información de manera más clara a los colaboradores del plantel. (Bolaños, 2013). Para establecer la recuperación de sólidos, es importante determinar inicialmente los sólidos de ingreso a la planta en Jugo Absoluto, para lo cual se aprovecha la información generada por el sistema de prensa o molinos. Así se determina la el porcentaje de Fibra en Caña (F%C) y a partir de ahí es posible conocer el Jugo Absoluto de ingreso a la fábrica, según la ecuación:

$$JA\%C = 100 - F\%C. \qquad \text{Ec.3.1}$$

Con este valor, y por determinación del porcentaje de sólidos del jugo de prensa (Bxjp), el cual se estima, es igual al Bx del JA%C, resultante del jugo extraído en la prensa hidráulica, se determina, extrapolando para 1 Tonelada de caña, la cantidad de Sólidos por Toneladas de caña que ingresa según la ecuación:

$$\text{Sólidos de Ingreso} = (JA\%C \cdot 10) \cdot Bxjp, (T). \qquad \text{Ec.3.2}$$

Con información básica de bultos producidos y cantidad de miel producida, es posible determinar los sólidos recuperados en azúcar y los sólidos obtenidos en la miel final, a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sólidos en Azúcar} = \text{Bultos} \cdot 50 / \text{Peso de caña molida}, (T). \qquad \text{Ec.3.3}$$

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

Sólidos Azucarados = Sólidos en Azúcar/Sólidos de Ingreso. **Ec.3.4**

Sólidos en Miel Final = kg de Miel / (Ton de Caña \* Brix de Miel Final). **Ec.3.5**

Sólidos en Miel Final (%) = Sólidos en Miel Final / Sólidos de Ingreso. **Ec.3.6**

### **3.10.- Simulación de procesos químicos**

La simulación de procesos químicos, es un conjunto de unidades de cálculo expresadas en rutinas programables, escritas en un lenguaje de programación. Estos sub-programas, una vez ejecutados en un equipo computacional, permiten obtener valores realistas para las variables de operación de un proceso químico.

Cualquier proceso químico, es susceptible de ser sometidos a simulación, siempre y cuando cuente con las siguientes características:

- Una cantidad finita de unidades operacionales donde se produzcan cambios físicos y/o químicos.
- Una red de corrientes que conecten las diferentes unidades operacionales y por donde circulan la materia y energía.

Así, la simulación de procesos químicos, trata de una recreación virtual, basada en modelos matemáticos de los procesos químicos y operaciones unitarias mediante el uso de un software.

Para crear una simulación eficiente se debe contar con el conocimiento pleno de las propiedades físicas y químicas de los componentes y mezclas involucrados en el proceso, así como también, de las reacciones y modelos matemáticos involucrados en el proceso a simular, de modo que sea factible realizar el cálculo requerido en un computador o cualquier otro equipo informático.

Es necesario destacar, que la simulación de procesos siempre otorga al usuario del software resultados aproximados y supuestos. Sin embargo, permite describir una propiedad en un rango bastante amplio de condiciones de operación, como temperaturas y presiones que no estuviesen cubiertas a totalidad por datos reales tomados *in situ*.

De este modo, pueden hacerse estudios completos realmente cercanos o muy aproximados a los datos obtenidos en mediciones reales en equipos industriales, permitiendo también extrapolar valores dentro de ciertos límites para buscar condiciones de operación fuera del rango de propiedades conocidas.

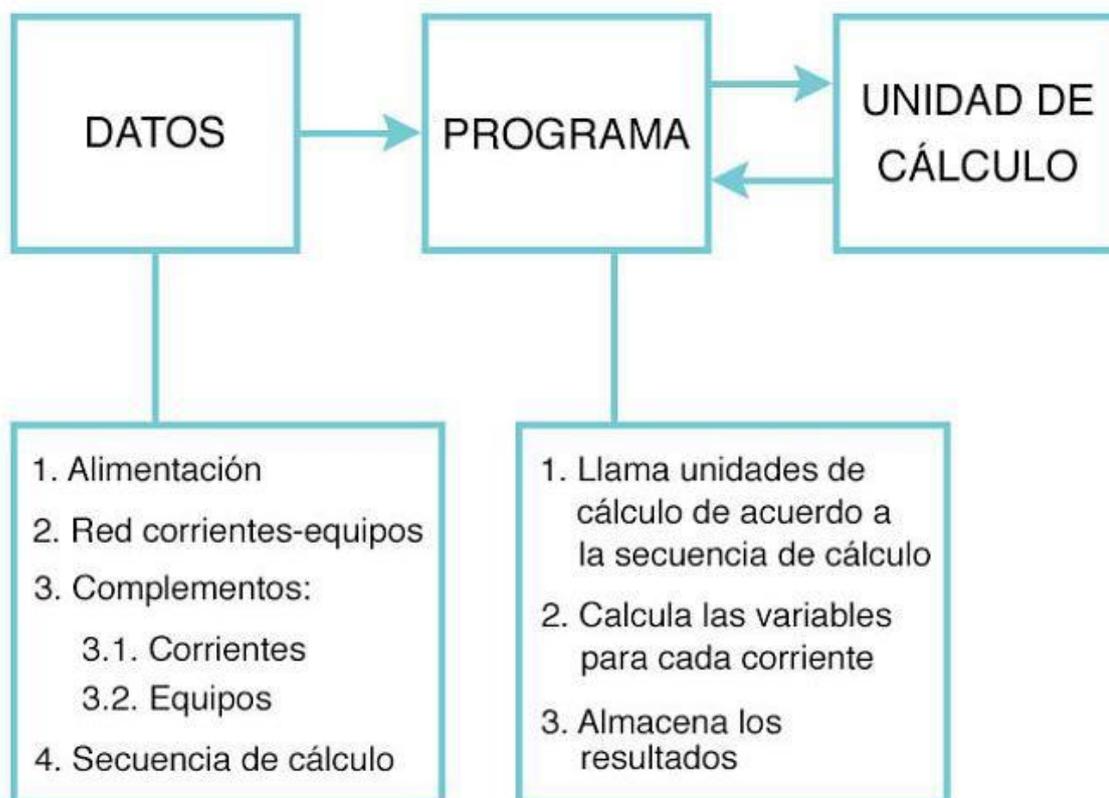
### **Consideraciones básicas de una simulación de procesos químicos**

Siempre y cuando se esté realizando la simulación de un proceso en estado estacionario, las características de la **corriente de salida** de una unidad de cálculo son obtenidas a partir de las características de la **corriente de entrada** y del conjunto de ecuaciones matemáticas que esté definiendo el proceso a estudiar.

También, se debe tener en cuenta tres elementos principales durante la simulación:

- El conjunto de datos a utilizar.
- El programa de simulación.
- Los modelos matemáticos de cada unidad de cálculo.

Estos elementos permitirán realizar la simulación interconectándose entre sí. En la Figura 3.2, se presenta una descripción detallada del proceso de simulación, visualizando la interconexión entre estos elementos:



**Figura 3.2.- Relaciones entre los elementos de un proceso de simulación**

## **Modelos matemáticos**

La creación y desarrollo de modelos matemáticos para la simulación de procesos químicos, es el punto focal del desarrollo de software de simulación. Crear o desarrollar estos modelos es la función del ingeniero químico, ya que el desarrollo o uso de modelos nuevos y más eficientes para el cálculo de las propiedades viene dado por el estudio de un proceso específico, utilizando los conocimientos de ingeniería de estos procesos.

Los **modelos matemáticos** a utilizar durante el desarrollo de las unidades de cálculo, deben tomar en cuenta los siguientes elementos:

- Propiedades físicas de los compuestos y mezclas que forman parte del estudio (por ejemplo: densidades, viscosidades, presión de vapor, etc.).
- Características y propiedades de los equipos a simular (por ejemplo: reactores, bombas, columnas de destilación, etc.).
- Reacciones químicas y cinéticas.
- Datos ambientales.
- Datos de seguridad.

Asimismo, existen dos tipos de modelos matemáticos utilizados, los cuales son:

- Correlaciones y ecuaciones con parámetros ajustables a datos experimentales.
- Métodos predictivos para estimar propiedades.

Cada uno de estos modelos serán seleccionados según la utilidad que puedan presentar para realizar las estimaciones por simulación.

## **Ventajas de la simulación de procesos químicos**

El uso de una simulación digital basada en el uso de modelos matemáticos que sean representativos del proceso a estudiar tiene las siguientes ventajas:

- Permite estudiar procesos existentes de manera rápida, completa y muy económica.
- Si se utiliza un modelo matemático adecuado, se pueden realizar extrapolaciones de resultados más allá de las condiciones de operación, lo cual es virtualmente imposible o impráctico en una planta real.
- Se pueden realizar comparaciones con minuciosidad y rapidez entre diferentes procesos, lo que permite realizar modificaciones al proceso o diseños extra que se requieran poner en operación. En pocas palabras, es factible realizar una evaluación completa de planes alternos al proceso original.
- La simulación permite controlar todos los factores que afectan al modelo matemático seleccionado, situación que no es del todo posible en condiciones reales.
- Ofrece la posibilidad de estudiar la sensibilidad de los parámetros básicos del sistema, así como de los parámetros de costos. Por ejemplo, una variación del 10% de la presión puede tener o no un efecto importante en el funcionamiento del sistema.

### **Aplicaciones técnicas de la simulación de procesos químicos**

La simulación de procesos químicos es una herramienta muy poderosa para el ingeniero químico, teniendo una gran cantidad de aplicaciones técnicas inmediatas, entre las cuales están:

- Optimizar operaciones con velocidad y seguridad.
- Predecir efectos producidos en el proceso por cambios en las condiciones de operación, condiciones de distribución y capacidades de los equipos involucrados.
- Evaluar los cambios en las condiciones de alimentación (realizar análisis del proceso a estudiar) de ciertas condiciones de operación y de la distribución de las redes corrientes-equipos (factores de diseño).
- Resolver balances de masa y energía con rapidez en procesos que requieran una gran cantidad de cálculos, o que sean de gran envergadura.
- Entrenar a ingenieros y operadores para el uso de sistemas de producción.
- Identificar unidades controlantes o cuellos de botella en un proceso.
- Estimar costos, realizar control de presupuesto y planificar la producción.

### **Pasos a seguir para desarrollar una simulación de procesos químicos**

1. Definición del problema y objetivos a lograr para justificar la realización de la simulación. Este procedimiento se realiza sobre la base de una serie de preguntas, estableciendo la precisión requerida para responderlas. En este paso, se debe estudiar el proceso para identificar las áreas sensibles económicamente, recolectar datos de los balances de materia y energía, así como también, de procedimientos de operación y control.
2. Desarrollar un caso base y analizar la sensibilidad del proceso con la finalidad de identificar unidades y parámetros, donde una pequeña perturbación sobre las condiciones de operación puede producir un cambio apreciable sobre aquellas variables de importancia para los fines de la simulación.
3. Analizar los recursos requeridos para lograr los objetivos de la simulación, considerando mano de obra, tiempo y dinero.
4. Desarrollar las unidades de cálculo o modelos de simulación.
5. Validar el modelo de simulación o evaluar la precisión de dicho modelo con datos reales del proceso.
6. Aplicación del modelo, interpretación y comprensión de los resultados.

### **Enfoque modular secuencial del diseño del proceso de simulación.**

El enfoque modular secuencial de simulación permite recrear el proceso de manera rápida y eficiente, basándose en modelos matemáticos y métodos numéricos para poder resolverlos.

Las características principales del enfoque modular secuencial de simulación son las siguientes:

- Las corrientes de entrada de cada una de las unidades a recrear, son utilizadas para calcular las corrientes de salida a partir de los principios de las operaciones unitarias o procesos unitarios que trata de describir la simulación.
- La red de corrientes-equipos debe ser conocida.
- Las corrientes de salida de cada una de las unidades a recrear, resultan posibles corrientes de entrada para otra unidad.
- El ingeniero debe reconocer cuando existen corrientes de recirculación (procesos iterativos de cálculo). En caso de presentarse, se debe especificar la secuencia de cálculo que minimiza el trabajo o contar con un programa propio que lo establezca de manera automática.

Dentro de estas características, las unidades operacionales (equipos), la red de corrientes-equipos y las corrientes de alimentación a los procesos, varían de un proceso a otro. Mientras que la identificación de los circuitos de reciclaje y de la secuencia de cálculo son mecanismos comunes a todos los problemas de cálculo y pueden ser automatizados o programados.

### **Programación del enfoque modular secuencial de simulación**

Los aspectos a interpretar por el ingeniero durante la simulación del proceso, utilizando el enfoque modular secuencial, se describen en la Tabla 3.1, que además se complementa con las tareas que corresponden al programa de simulación. Esta es una simbiosis bastante interesante, donde se ahorra mucho tiempo y recursos de trabajo.

**Tabla 3.1.- Enfoque modular secuencial de simulación**

<b>El ingeniero debe suministrar</b>	<b>El programa debe realizar</b>
Características de las alimentaciones al proceso.	Lectura y almacenamiento de datos.
Descripción de red corrientes-equipos.	Almacenamiento bajo forma de Tabla de la unión entre corrientes y unidades.
Lista de información para corrientes y equipos.	Almacenamiento bajo forma de Tabla de la información relativa a las corrientes y unidades.
Especificación de la secuencia de cálculo (si es requerido).	Determina la secuencia de cálculo, si esta no es suministrada.
Modelos matemáticos de todas las unidades independientes del tiempo.	Ejecución del cálculo de cada una de las unidades, siguiendo la secuencia de cálculo y el almacenamiento de los resultados.
Información de control para la impresión de los resultados, procesos de convergencia, etc.	Imprime los resultados deseados y ejecuta órdenes prescritas.
Interpretación de los resultados.	Otorgar resultados.

El proceso de simulación es aproximado, no representa fielmente a la realidad, sin embargo, puede aproximarse mucho. Por ello, es una herramienta predictiva que ayuda mucho en la optimización, análisis, diseño y control de los procesos. Asimismo, el ingeniero debe conocer cada detalle del proceso a recrear, ya que debe interpretar los resultados.

El simulador no sustituye la tarea, de hecho, muchas veces los resultados dados son erróneos o simplemente se alejan de lo que sucede en condiciones reales y queda de parte del ingeniero identificar lo que está sucediendo y cómo solucionarlo, de allí la importancia de tener dominio del proceso y conocer los modelos matemáticos a utilizar durante la simulación.

### **3.11.- Etapas de desarrollo de software.**

La ingeniería de software requiere llevar a cabo numerosas tareas agrupadas en etapas, al conjunto de estas etapas se le denomina ciclo de vida. Las etapas comunes a casi todos los modelos de ciclo de vida son las siguientes (Kendall & Kendall, 2005):

- **Etapa de Análisis:** Es el proceso de investigar un problema que se quiere resolver. Definir claramente el Problema que se desea resolver o el sistema que se desea crear. Identificar los componentes principales que integrarán el producto.
- **Etapa de Diseño:** Es el proceso de utilizar la información recolectada en la etapa de análisis al diseño del producto. La principal tarea de la etapa de diseño es desarrollar un modelo o las especificaciones para el producto o Componentes del Sistema.
- **Etapa de Desarrollo:** Consiste en utilizar los modelos creados durante la etapa de diseño para crear los componentes del sistema.
- **Etapa de Pruebas o Validación:** Consiste en asegurar que los componentes individuales que integran al sistema o producto, cumplen con los requerimientos de la especificación creada durante la etapa de diseño.
- **Etapa de Implementación / Implantación:** Consiste en poner a disposición del cliente el producto.

## **Capítulo IV: Diseño Metodológico.**

### **4.1.- Tipo de Investigación:**

El presente trabajo ha sido una investigación que tiene las siguientes características:

**Según su aplicabilidad:** Es una investigación aplicada, estuvo orientada al estudio de un problema concreto de la Ingeniera de Procesos, relacionada con la modelación, simulación optimización y control del proceso de producción de azúcar en la Compañía Azucarera del Sur, S.A. en la cual utilizando los conocimientos teóricos, las habilidades y destrezas practicas adquiridos en asignaturas tales como Introducción a la Programación, Análisis Numérico, Balance de Materia y Energía, Procesos Industriales y Transferencia de Masa y a partir del estudio y análisis de la problemática industrial se desarrolló a una herramienta para el control de la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización orientada a optimizar la eficiencia productiva de esta área de la empresa.

**Según el nivel de profundidad del conocimiento:** Se clasificó como una investigación predictiva, combinada con elementos de las investigaciones descriptiva y explicativa, dado que el estudio predice los valores de las eficiencias de recuperación de sólidos en azúcar y miel final de cada etapa de producción, a partir de los modelos matemáticos desarrollados con la técnica de balances de materia y energía, explicando las causas y describiendo los efectos de esos resultados, los cuales sirven de fundamentos para la toma de decisión de los directivos y trabajadores del área de cristalización.

**Según la amplitud con respecto al proceso de desarrollo del fenómeno:** La investigación ha sido de corte transversal, dado que la producción de azúcar se realiza por periodos, es decir solo en tiempos de zafra. No obstante, los resultados obtenidos se pueden implementar en los siguientes periodos de producción, sin contratiempos.

### **4.2.- Determinación del Universo**

La fabricación del azúcar propiamente se da en el área de cristalización que incluye el proceso de cocción de la melaza y su posterior formación de cristales de azúcar, por lo tanto, el universo de estudio está conformada por el área de cristalización de esta empresa, que incluye sus distintos procesos y operaciones, maquinaria, equipos y accesorios, abarcando incluso el personal que labora en esta área.

### **4.3.- Metodología para la ejecución de la investigación**

Este trabajo monográfico, se enmarcó en el contexto de una evaluación tecnológica, según lo dispuesto en el Instructivo de realización del trabajo de diploma en la Facultad de Ingeniería Química y estuvo orientado a darle solución a un problema específico en la industria nacional, que este caso consistió en la elaboración de una herramienta para la planificación y control de la producción de azúcar, para optimizar el funcionamiento del área de cocción y cristalización de esta empresa, correspondiendo a su vez a

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

la línea de investigación de Ingeniería de procesos relacionada con la modelación, simulación, optimización y control de procesos. Esta investigación estuvo constituida por un conjunto de estudios, análisis y propuestas de actuación y seguimiento que abarcan la operación y funcionamiento del área de cristalización en todas sus etapas y componentes que han sido objeto de estudio y que comprendió lo siguiente:

### **Etapas I: Estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A, en el cual:**

- Se identificaron las etapas operacionales que lo integran, considerando los distintos procesos y operaciones que se realizan en esta área de producción, así como también, la maquinaria, equipos y accesorios en que ocurren estos distintos procesos y operaciones.
- Se determinaron las variables de estado con sus correspondientes valores operacionales que gobiernan los distintos procesos y operaciones de la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.
- Se cuantificaron los flujos de materiales, subproductos y productos obtenidos en los distintos procesos y operaciones que ocurren en el proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización y que integran el inventario del área de cristalización, abarcando también el stock de azúcar.
- Se configuró el diagrama del flujo del proceso de producción de azúcar correspondiente al área de cocción y cristalización, representando los flujos de materiales, subproductos, productos, así como las variables de estado y parámetros operacionales de cada etapa.

### **Etapas II: Desarrollar el modelo matemático basado en los balances de materia del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur para el proceso de simulación**

Los hallazgos encontrados, en la etapa anterior, han sido analizados, sistematizados y procesados, y han servido de insumos para el desarrollo del sistema de simulación para la planificación y control de la producción de azúcar, en el área de cristalización, centrándose básicamente en el diseño del algoritmo de resolución del problema que corresponde a la formulación del Balance de Masa de los procesos y operaciones que ocurren en el área de cristalización durante la fabricación del azúcar, para determinar las cantidades en masa, correspondiente a la recuperación de sólidos en azúcar y miel final.

Para la ejecución de esta etapa, se emplearon las técnicas de la ingeniería del software que incluye lo siguiente:

- Análisis del problema
- Diseño del algoritmo de resolución del problema
- Desarrollo de la aplicación informática que incluye la selección de la herramienta computacional y/o lenguaje de programación, su codificación, ejecución, prueba y validación de los resultados obtenidos.

### **Etapa III: Implementación de proceso de simulación para la planificación y control de la producción.**

Una vez que se formuló el modelo matemático, este se validó y se procedió a su ejecución práctica:

- Se determinaron en tiempo real, las cantidades de los distintos materiales que participan en el proceso de producción de azúcar ya sea; materia prima, subproducto y producto final en el área de cristalización.
- Se definieron metas y planes de producción de azúcar conforme los recursos disponibles, las capacidades de los equipos y maquinarias de la empresa.
- Se controló en tiempo real la producción de azúcar en el área de cristalización.
- Se determinaron los valores de los flujos másicos de sólidos recuperados tanto en azúcar como en miles finales, conforme requerimientos futuros de la empresa.
- Se determinó la eficiencia del rendimiento del proceso de cristalización con relación a la recuperación de sólidos en azúcar y miel final, así como en el stock de materiales del área de cristalización.

#### **4.4.- Métodos y procedimientos para la realización del estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A.**

Se aplicaron las siguientes técnicas de recopilación de información:

**4.4.1.- Entrevistas semiestructuradas:** Se recopiló información a través del diálogo directo entre el investigador y el personal a cargo del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A.

Durante la aplicación de esta técnica el investigador realizó preguntas estructuradas al trabajador del área de cristalización, dirigidas a obtener una información específica, sobre las etapas operacionales, organización y funcionamiento del área de cocción y cristalización, las alterna con preguntas espontáneas, que permiten profundizar sobre los aspectos de interés de la investigación, permitiendo una mayor libertad y flexibilización en la obtención de información. Esta estrategia, fue la más adecuada para estas condiciones, ya que, son precisamente estas personas las que conocen y pueden explicar realmente los pormenores relacionados con el funcionamiento y operación de esta área.

- Se entrevistó al siguiente personal que labora en el área de cristalización y que de previo manifestó su disposición de colaborar con este estudio:
- Operadores del área de cocimiento y cristalización
- Supervisor del área de cocimiento y cristalización
- Ingeniero de Diseño y Mantenimiento
- Asistente de Diseño

La guía de entrevista semiestructurada se presenta en el **Anexo I**.

**4.4.2.- Observación y Mediciones Directas:** Consistió en visitas e inspecciones directas en el área de cristalización, por medio de las cuales se observaron y realizaron:

- Mediciones de propiedades físico-químicas de las sustancias de interés, utilizando equipos de medición y control del proceso y operaciones del área de cristalización y/o de la sección de Laboratorios, aplicando los procedimientos y protocolos del Laboratorio.
- Estudio y análisis del funcionamiento y operación de equipos, maquinarias y accesorios del área de cocción y cristalización directamente o a través de las bitácoras de operación del área de cristalización.
- Determinación de características técnicas de los equipos maquinarias y accesorios del área de cocción y cristalización, por observación directa y/o recopilando información de las cartas técnicas de cada equipo.
- Determinación de las magnitudes de las variables de estado que gobiernan el proceso utilizando equipos de medición y control del proceso y operaciones del área de cristalización y/o de la sección de Laboratorios.

**4.4.3.- Aplicación de la técnica de Construcción de diagrama de flujo de proceso.**

Con la información recopilada, y el análisis de la misma, se estructuró el correspondiente diagrama del flujo del proceso de producción de azúcar del área de cocción y cristalización, representando las corrientes de materiales, subproductos, productos, así como las variables de estado y parámetros operacionales de cada etapa. Este diagrama de flujo del proceso de cristalización, permitió comprender y explicar a mayor detalle la estructura, organización y funcionamiento de los procesos operaciones y etapas de la fabricación de azúcar en el área de cocción y cristalización.

**4.5.- Métodos y procedimientos para el desarrollo del sistema de simulación para el control de la producción de azúcar en el área de cristalización.**

Los resultados de la etapa correspondiente al Estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A, fue la información básica e insumos para el desarrollo del modelo matemático y simulación para la planificación y control de la producción de azúcar, en el área de cristalización. El diseño del algoritmo de resolución del problema se basó en los métodos, técnicas y procedimientos del Balance de Masa para procesos de producción en estado estacionario, así esta técnica se aplicó a los procesos y operaciones que ocurren en el área de cristalización durante la fabricación del azúcar, considerando la recuperación de sólidos en azúcar y miel final.

**4.5.1- Análisis del problema:** El problema identificado estuvo relacionado con la determinación de sólidos en azúcar y miel final. Así como con la identificación y cuantificación de las distintas corrientes de materiales que interactúan en cada unidad de proceso en la casa de cocimiento del área de cristalización.

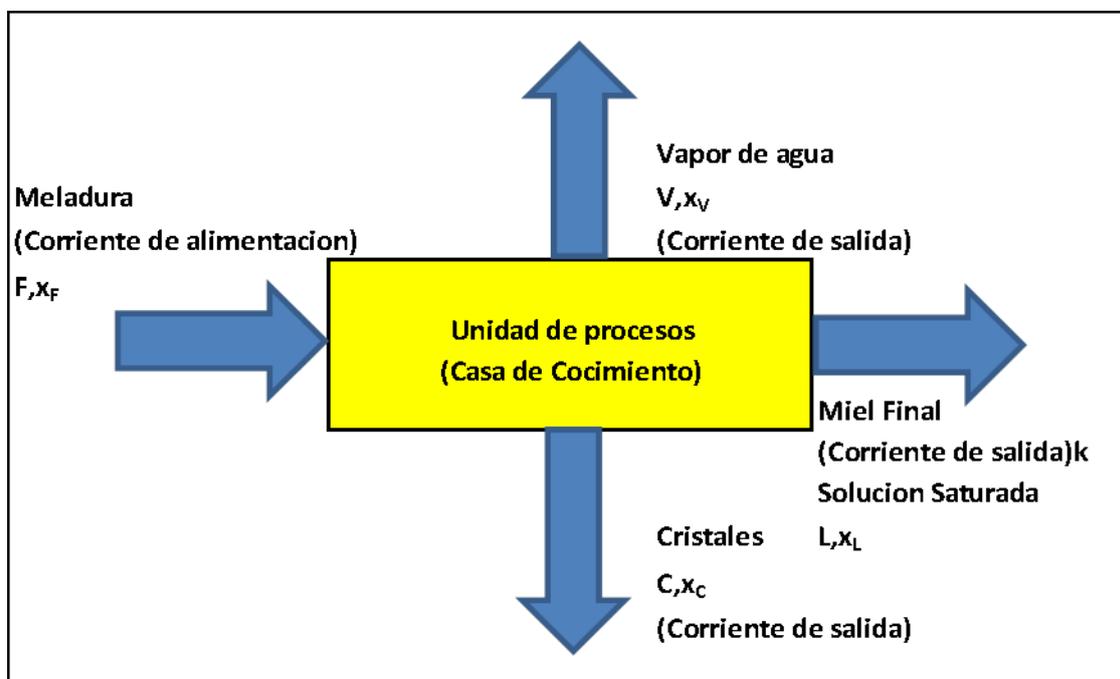
#### **4.5.2.- Diseño del algoritmo de resolución del problema:**

El diseño del algoritmo se basó en la aplicación de la herramienta de Ingeniería Química, conocida como Balance de materia. De acuerdo con los requerimientos del problema se formularon las siguientes etapas:

##### **4.5.2.1.- Formulación del balance de masa de sólidos en casa de cocimiento.**

La formulación del balance de masa se realizó conforme los siguientes pasos:

- a) Con la información procedente de la etapa anterior y del flujograma del proceso de cristalización en casa de cocimiento, se identificaron las distintas corrientes que entran, salen y /o se acumulan en cada unidad de proceso, es decir se consideraron todas las posibles corrientes que atraviesan el volumen de control definido. ( Ver Figura 4.1)
- b) Se definió una base de cálculo con relación al flujo másico para todas las corrientes identificadas en el proceso de producción.
- c) Aplicando las técnicas de Top-Down (diseño descendente), se formularon :
  - Balance de masa total de sólidos
  - Balance de masa de sólidos en cada etapa del proceso relacionado directamente al sistema de masas establecido en la fábrica.
- d) Se estructuró el sistema de ecuaciones y se resolvió, utilizando el Componente Solver de Excel.



**Figura 4.1.- Balance de masa en la unidad de proceso – Casa de Cocimiento. Área de Cristalización.**

Siendo las ecuaciones para: cada tipo de Balance, las siguientes.

**Balance de masa total**

$$F = V + L + C \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde

F- corriente de alimentación, Kg/h

V- corriente de vapor de agua, Kg/h

L- corriente de solución saturada, Kg/h

C- corriente de cristales, Kg/h

**Balance de masa por componente**

$$F \cdot xF = V \cdot xV + L \cdot xL + C \cdot xC \quad (\text{Ec.4.2.})$$

Donde

X - representa la composición correspondiente al componente F,V,L,C.

La solución del sistema de ecuaciones permitió conocer en tiempo real las cantidades presentes de meladura, azúcar, y miel final en cada etapa del proceso y según el esquema de cocimiento empleado en la fábrica, las masas de cocimientos A,B,C, así como también Magma B,C y semillas.

**Determinación de eficiencia teórica y real del proceso de cocción y cristalización**

Se determinó la eficiencia teórica en el área de cristalización por medio de:

$$E.F.T = \left( \frac{M_{SAA}}{M_{SAM}} \right) (100) \quad (\text{Ec.4.3.})$$

Donde

E.F.T- representa la eficiencia teórica en el área de cristalización.

La eficiencia real, se determinó como la Masa de Sacarosa del azúcar producido más la Masa de Sacarosa presente en el Stock de materiales, dividido entre la cantidad de sacarosa que debe ingresar contenida en la Meladura en el área de cristalización multiplicado por cien, de acuerdo con la ecuación.

$$E.F.R = \frac{(M_{SAA} + M_{SAST})}{M_{SAM}} * 100 \quad \text{Ec.10}$$

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

Donde E.F.R es la eficiencia real en %, y el subíndice SAST es sacarosa en stock.

### **4.6.- Procedimientos y criterios de selección de la herramienta computacional para el desarrollo del sistema de simulación, ejecución, prueba y validación de los resultados obtenidos**

Con el modelo matemático desarrollado y su algoritmo de solución, se procedió a realizar la simulación del proceso producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización. En este caso se ha utilizado la hoja de cálculo electrónico de Excel y su componente Solver, siendo seleccionado por su sencillez, accesibilidad y costos.

La simulación consistió en alimentar los datos de entrada, provenientes de la etapa de estudio del proceso de cocción y cristalización, aplicando el paso a paso para la utilización del Componente Solver de Excel, descrito en el Anexo III, obteniendo como resultado lo siguiente:

- las cantidades en tiempo real, de los distintos materiales que participan en el proceso de producción de azúcar ya sea este como materia prima, subproducto y producto final y que conforman el inventario y el stock en el área de cocción y cristalización.
- planes de producción de azúcar con sus metas actualizadas en tiempo real en correspondencia con los recursos disponibles, las capacidades de los equipos y maquinarias de la empresa.
- el control en tiempo real la producción de azúcar en el área de cristalización.
- la eficiencia del rendimiento del proceso de cristalización con relación a la recuperación de sólidos en azúcar y miel final, así como en el stock.

### **4.7.- Instrumentos para recopilar información**

#### **4.7.1.- Trabajo de Gabinete**

En trabajo de escritorio, consistió en la sistematización de la información, su análisis y procesamiento, deduciendo los hallazgos correspondientes que permitieron comprender y explicar la estructura, organización y funcionamiento de los procesos operaciones y etapas de la fabricación de azúcar en el área de cocción y cristalización. Así como deducir correctamente la definición del problema a resolver con este trabajo monográfico.

#### **4.7.2.- Trabajo de Campo**

En el trabajo de campo, se aplicaron los instrumentos de entrevista al personal de producción, se realizaron observaciones in situ y se obtuvieron resultados del Laboratorio de control técnico de la producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización.

## **Capítulo 5: Etapas operacionales, y componentes del proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.**

### **5.1. Estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera, Descripción del proceso de Casa de Cocimiento.**

El estudio del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A, se realizó por medio del reconocimiento in situ de las instalaciones de casa de cocimiento y cristalización en el Ingenio, lo que permitió identificar las diferentes áreas, operaciones, maquinarias, equipos y accesorios, que integran este proceso. Con la información obtenida, se elaboró el flujograma de proceso de cocción y cristalización, indicando los flujos másicos de materiales y los parámetros operacionales en cada una de las etapas de casa de cocimiento. Se identificaron las siguientes áreas:

- (i) Estación de tanques de meladura y mieles
- (ii) Estación de Tachos, recibidores masas cocidas, semilleros y cristalizadores
- (iii) Estación de centrifugas de masas cocida A, B, y C
- (iv) Secado y Empaque.

El área de estudio para la formulación de los balances de masas orientados a la determinación de los sólidos recuperables tanto en meladura como en mieles finales en casa de cocimiento se limita a las estaciones (i) y (ii). La estación (iii), es una etapa intermedia, en la cual el material pasa de tránsito en las centrifugas, donde ocurre la separación de materiales en azúcar y mieles. La estación (iv), de igual forma no altera el balance de sólidos solubles y de sacarosa, es una etapa en la que se elimina la humedad, la cual se ha considerado en el balance global como vapor de agua.

#### **5.1.1. - Procesos y operaciones del proceso de cocción y cristalización de la Compañía Azucarera del Sur, S.A.**

La Compañía Azucarera, emplea un esquema de tres etapas de cristalización, es decir de tres templeas conocido como: “**Sistema moderno de tres masas cocidas con doble magma**”, donde se obtienen azúcares A y B para la venta. Este esquema se representa en la Figura 5.1.

La operación en casa de cocimiento se lleva a cabo en “Tachos”, los cuales son equipos de transferencia térmica que trabajan a una presión de vacío de 26 pulgadas de altura de una columna de Hg. Se calientan con el vapor del primer efecto proveniente de los vasos evaporadores 1, 2,3. La temperatura de operación de estos equipos es de 65°C. El vacío es producido por condensadores barométricos de toberas, alimentados por agua del Lago Cocibolca.

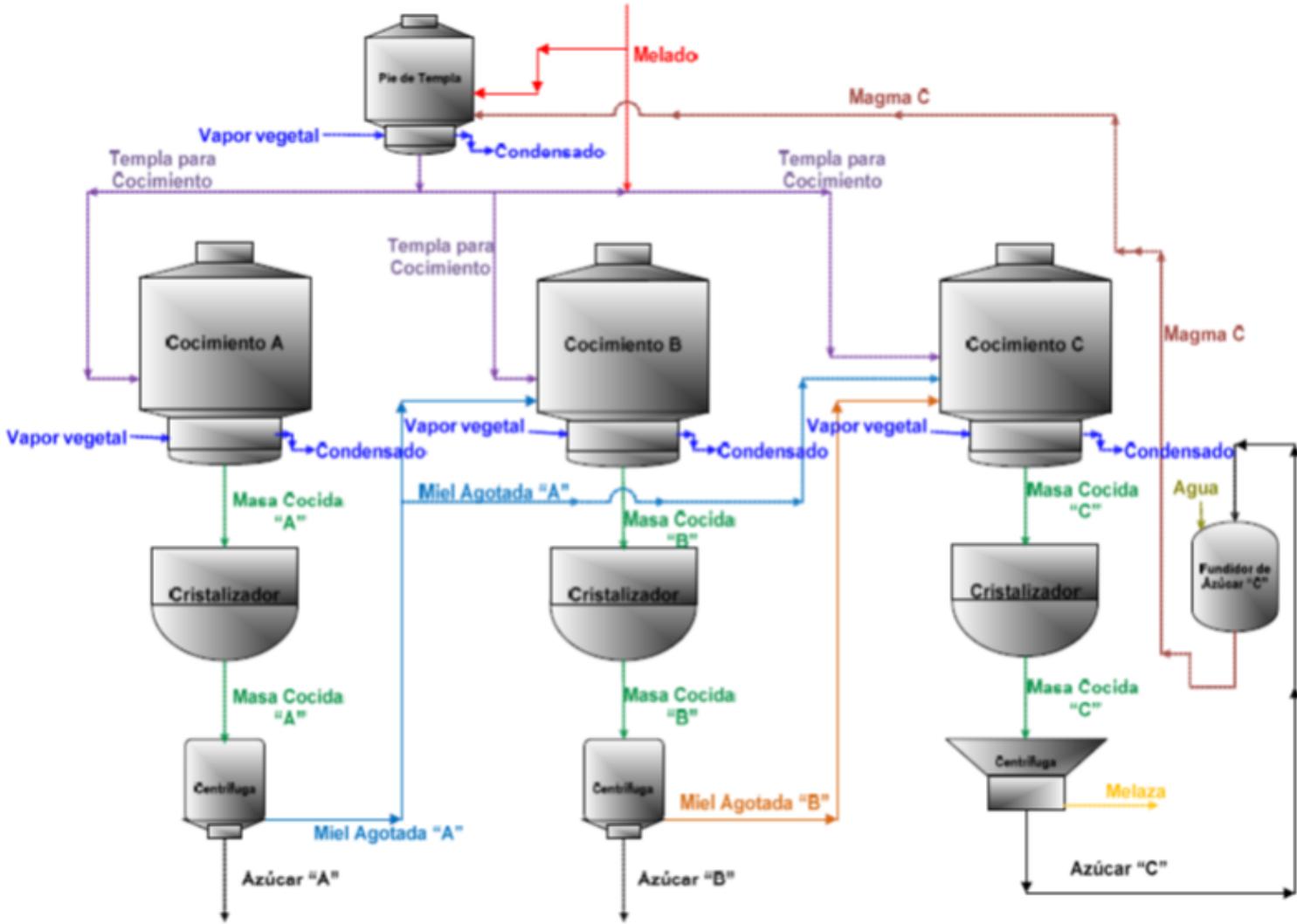


Figura 5.1.- Sistema moderno de tres masas cocidas con doble magma.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

La materia prima que procesa en Casa de Cocimiento es meladura, proveniente del área de evaporadores con una concentración de sacarosa, entre 60° Bx a 65° Bx, que se deposita en los tanques de meladura.

De la meladura se elabora la masa cocida A en los tachos designados para realizar este trabajo. En las centrifugas, a partir de la masa cocida A, por separación se obtiene el azúcar A y la miel A. El azúcar A, pasa a un sistema de transporte activado por vibración, que lo lleva hasta un elevador que lo conduce y lo deposita en el secador, una vez seco, el azúcar pasa a la sección de empaque, donde es empacado en sacos de 50 kilogramos; y finalmente se almacena en las bodegas de azúcar, como producto terminado listo para su comercialización.

La miel A, es bombeada hacia la estación de tanques ubicada en Casa de Cocimiento, donde es recepcionada en los tanques de miel A, para reprocesarla en los tachos. La miel A se emplea para elaborar masas cocidas B en los tachos destinados a fabricar este tipo de masas cocidas. Al purgar las masas cocidas B, producen azúcar B y miel B. El azúcar B, es depositada en un transportador helicoidal, que lo lleva a un mezclador; donde se mezcla con pequeñas proporciones de jugo clarificado o en su defecto agua para convertirlo en magma B. El Magma B se envía a un tanque receptor de magma, conocido como “**Magmero**”, en espera de ser desarrollada con meladura en los tachos, la cual se usa como semilla de pie directo para la elaboración de masas cocidas A.

La miel B es enviada por bombeo hacia los tanques receptores de miel B para reprocesarla. Del reproceso de la miel B en los tachos, se fabrican masa cocidas C.

De las masas cocidas C al ser purgadas en las centrifugas se obtiene azúcar C, y miel C, llamada en el lenguaje técnico azucarero miel final y comercialmente melaza.

El azúcar C, se deposita en el transportador helicoidal, que lo traslada al mezclador, aquí se mezcla con una pequeña proporción de jugo clarificado o agua para convertirse en Magma C.

El Magma C es bombeado al Magmero, luego se desarrolla en los tachos con meladura para convertirse en pie directo de semilla para fabricar masas cocidas B. La miel final se envía hacia los tanques de almacenamiento de melaza, lista para su comercialización.

### **5.1.2. - Maquinaria, equipos y accesorios en que ocurren los procesos de cocción y cristalización del azúcar.**

#### **Descripción de los tachos y equipos auxiliares en Casa de Cocimiento.**

El tacho es un equipo industrial herméticamente cerrado que trabaja al vacío de simple efecto, donde se procesan la meladura y las mieles para fabricar azúcar. Para este proceso, cuenta con siete tachos: 2 de tipo de calandria flotante 5 de calandria con tubo central. La estructura y función, de estos equipos, se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1.- Estructura y función de los Tachos en el casa de cocimiento.**

<b>No. Tacho</b>	<b>Tipo Calandria</b>	<b>Masa cocida a preparar</b>
1	Tubo central	MCC
2	Tubo central	MCB
3	Tubo central	MCB
4	Flotante	Semilla 2ª / MCA
5	Flotante	MCC
6	Tubo central	MCA
7	Tubo central	MCA

Fuente: Elaboración propia

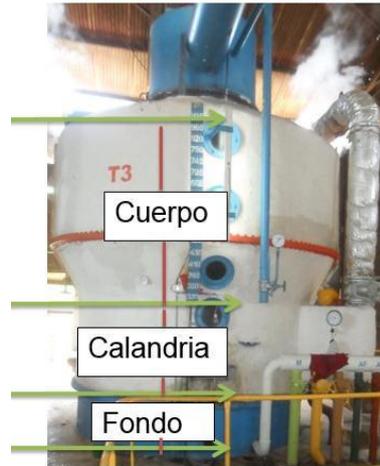
Las partes principales de un Tacho son:

**Fondo:** parte inferior del tacho, que en combinación con la calandria y el cuerpo realizan el trabajo del proceso de fabricación de masas cocidas y de semilla ya que la cristalización, ocurre al movimiento de estos productos dentro del tacho; es el lugar donde se alimenta el tacho de los productos que se están procesando que puede ser por la periferia o de forma radial; por el centro del fondo se descargan las masas cocidas; su estructura consiste en un fondo cónico y un anillo que se une a la calandria.

**Calandria:** Es la parte central del tacho y la más importante; es la que en combinación con el cuerpo define la capacidad del tacho; trascendiendo con mayor incidencia la calandria; también es donde se da el intercambio de calor entre el material que circula dentro de la calandria y el vapor que circula a lo externo de la calandria, para que se logre la evaporación de dicho material en el proceso de cristalización; razón lógica que nos indica que consta de una cámara de vapor.

Dentro de los tipos de calandria se encuentran la calandria fija con tubo central y la flotante sin tubo central, sin embargo su funcionamiento es el mismo, y difieren en la circulación del material que se procesa dentro del tacho; en la calandria flotante el movimiento es radial referente a la calandria y en la calandria fija con tubo central, el movimiento es convergente al centro de la misma.

**Cuerpo:** Es la parte superior del tacho donde se va alojando el material procesado; el volumen del cuerpo es igual a dos veces el volumen de la calandria; lo que determina la capacidad del tacho y el volumen útil de trabajo; por la parte superior del cuerpo se desalojan los vapores.



**Figura 5.2. – Tacho Tipo Calandria.**

### **Instalaciones y accesorios en Tachos**

Las tuberías de alimentación de meladura, miel A, miel B, y de lavado están ubicados desde los tanques de almacenamiento, los que junto a los tubos de agua caliente y de agua fría se dirigen hacia los tachos; que antes de llegar a los tachos, están instaladas de manera que pasan frente al operador (tachero); formando una especie de bandeja o marimba de válvulas en cada tacho para facilitar la operación de alimentación de estos productos al tacho observar imagen5.1; luego toda la tubería converge en un sola línea de tubo que llega y está instalado a la periferia (anillo) del fondo del tacho. Diámetro de la tubería = 4 pulgadas.



**Figura 5.3. Tuberías de alimentación a los tachos Marimba.**

Para la alimentación de Magma, y de cualquier tipo de semilla almacenada en los semilleros existe una tubería instalada común para todos los semilleros y para todos los tachos que llega a una válvula de pie de 4 pulgadas instalada en la sección radial del fondo cerca de la válvula de descargue de cada tacho. En la parte central del fondo de la sección cónica se encuentra instalada la válvula de descargue de masas cocidas y en la periferia del anillo se encuentra

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

una válvula de alta presión de 2 pulgadas de entrada de vapor directo para usarlo como vapor de escoba y para limpieza del tacho.

**Instalaciones en la calandria de un tacho:** La calandria tiene Instalaciones interna con respecto al tacho; refiriéndose específicamente a la cámara de vapor y en la parte externa.

### **A.- Instalaciones Internas:**

**Instalaciones en el cuerpo de un tacho:** El cuerpo del tacho tiene las siguientes instalaciones:

- Internamente en la parte superior del cuerpo está instalado un separador de arrastre y a lo largo de la altura del cuerpo se encuentra una tubería de inyección de agua atomizada para limpieza de las mirillas; las demás instalaciones son externas.
- Vacuómetro
- Termómetro
- Tubería de 3 pulgadas para romper vacío en la parte superior del envoltorio del cuerpo
- Tubería de 4 pulgadas a la atmósfera en la parte superior (techo) del cuerpo.
- Mirillas alineadas a lo largo del envoltorio del cuerpo.
- Sonda de muestreo del material dentro del tacho al alcance del operador.
- Bandeja de dosificación y de acumulación de desechos de muestreo.
- Tubería de 3 pulgadas de entrada de vapor directo de alta presión de uso como vapor de escoba, instalado en la parte superior del envoltorio del cuerpo.
- Manhole aproximadamente a un metro arriba sobre la calandria.

**Equipos auxiliares e Instalaciones:** Para el funcionamiento integral del tacho es indispensable el acoplamiento en las instalaciones del tacho de dos equipos auxiliares con sus respectivos componentes que son; la bomba de agua de inyección y el condensador barométrico de eyectores.; lugar exacto donde se condensan los vapores producidos de la evaporación del material en proceso dentro del tacho.

### **Partes del condensador barométrico y sus instalaciones**

- Cono superior.
- Cuerpo.
- Cono inferior.
- Columna barométrica.
- Tubería de 20 pulgadas de diámetro de circulación de vapores del material en proceso dentro del tacho, que une la parte superior central del techo del tacho con la parte central del cono superior del condensador.
- En la parte interna del cuerpo esta la cámara de agua y los eyectores de los cuales sale el agua de inyección al cuerpo para mezclarse con los vapores que llega de la tubería de vapores ocurriendo la condensación por contacto directo.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

- Bomba de agua de inyección de 1500 galones por minuto a la cámara de agua del condensador por medio de una tubería de 4 pulgadas de diámetro con su respectiva válvula de regulación.

### **Capítulo 6: Parámetros operacionales que gobiernan los procesos y operaciones de la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización.**

Los parámetros operacionales que gobiernan los procesos y operaciones de la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización determinantes de su calidad son los siguientes:

**Grados Brix del Jugo:** Se refieren al contenido de sólidos solubles totales presentes en el jugo, expresados como porcentaje. Los Grados Brix incluyen a los azúcares y a compuestos que no son azúcares, pueden ser medidos en el campo, en la misma plantación, utilizando un refractómetro manual para grados Brix o HR Brix. Para esto se perforan varias plantas en el campo y se colecta su jugo para formar una muestra compuesta que será analizada. Luego se pone una gota del jugo compuesto en el refractómetro manual y se hace la medición de Grados Brix. El campo circular del visor se oscurece a medida que aumenta el nivel de Grados Brix, que puede ser leído fácilmente. El refractómetro manual para Grados Brix tiene graduaciones de 0 a 32%. Las lecturas de Grados Brix pueden tomarse por separado en la parte superior o inferior del cultivo. Un rango estrecho de lectura indica madurez de la caña, mientras que un rango amplio indica que la caña ya está demasiado madura. Por otro lado, si la parte inferior de la caña tiene un menor valor de Grados Brix que la parte superior, esto indica que la caña está sobremadura y que está ocurriendo reversión del azúcar.

**Grados POL (Porcentaje POL):** El porcentaje de sacarosa del jugo es el contenido real de azúcar de caña presente en el jugo. Se determina con un polarímetro, de ahí que el porcentaje de sacarosa también sea llamado como Porcentaje POL. Para efectos prácticos el porcentaje de sacarosa y el porcentaje POL son sinónimos. En la actualidad existe un instrumento llamado sucrolisador, que también determina el porcentaje de sacarosa en el jugo.

**Coefficiente de Pureza:** Se refiere al porcentaje de sacarosa respecto al contenido total de sólidos solubles del jugo. Una mayor pureza indica que existe un contenido mayor de sacarosa que de sólidos solubles en el jugo. El porcentaje de pureza junto con el porcentaje de sacarosa ayudan en la determinación de la época de madurez.

**Porcentaje de Pureza = (% Sacarosa / HR Brix) \* 100**

Un cultivo de caña de azúcar está apto para la cosecha cuando ha alcanzado un mínimo de 16% de sacarosa y 85% de pureza.

**Azúcares Reductores:** Se refiere al porcentaje de otros azúcares (fructosa y glucosa) presentes en el jugo. Un menor nivel de azúcares reductores indica que la mayoría de ellos han sido convertidos en sacarosa.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

**Azúcar Comercial de Caña:** El azúcar comercial de caña (ACC) se refiere al porcentaje de todo el azúcar recuperable de la caña. Se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{ACC (ton/ha)} = [\text{Producción (ton/ha)} \times \text{Recuperación de Azúcar (\%)}] / 100$$

$$\text{Recuperación de Azúcar (\%)} = [S - 0.4 (B - S)] \times 0.73$$

Donde,

S - Sacarosa en el jugo (%)

B - Grados Brix corregidos (%)

**Capítulo 7: Desarrollo del modelo matemático basado en los balances de materia del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur para el proceso de simulación**

**7.1. Balance global de materiales del sistema de cocimiento y cristalización.**

En la Figura 7.1, se presentan los componentes de la unidad de proceso en casa de cocimiento y los flujos de entradas y salidas de los materiales que participan en el proceso de producción de azúcar.

Para formular el balance global de materiales del sistema de cocimiento y cristalización, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- La meladura es una solución que contiene sólidos solubles disueltos en el jugo y agua.
- El agua se evapora y quedan solo los sólidos solubles recuperados
- Los sólidos solubles están compuestos por cristales de azúcares, mieles finales e impurezas.

Se formuló el balance global por componentes tanto para los sólidos solubles como para el contenido de sacarosa presentes en la meladura, en el azúcar y mieles finales, usando las Ecuaciones 7.1 y 7.2 respectivamente.



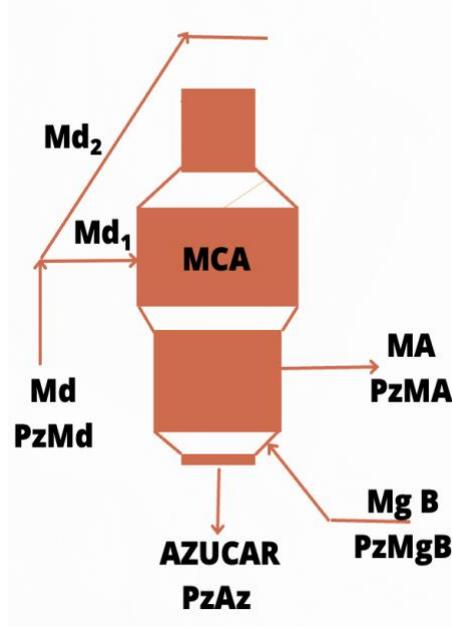
**Figura 7.1. Componentes de la unidad de procesos en casa de cocimiento y flujos de trabajo.**

Balance de solidos:  $Az + Mf = Md$  (Ec.7.1)

Balance de sacarosa:  $PzAz*Az + PzMf*Mf = PzMd*Md$  (Ec.7.2)

## **7.2. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida A**

En la formulación del balance de materiales por componente en Masa Cocida A, se utiliza la Figura 5.1, en la que se representa el equipo etiquetado como MCA en la que se muestran los flujos de materiales que entran y salen de este equipo



**Figura 7.2. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida A**

Se formuló el balance global por componentes tanto para los sólidos solubles como para el contenido de sacarosa presente en la Meladura, Magma B, Azúcar, Miel Final  $A_1$  y Miel final  $A_2$  usando las Ecuaciones 7.3 y 7.4, respectivamente.

Balance de sólidos:

$$Md_1 + MgB = Az + MA_1 + MA_2; \quad (Ec.7.3.)$$

Balance de sacarosa:

$$PzMd * Md_1 + PzMgB * MgB = PzAz * Az + PzMA * MA_1 + PzMA * MA_2 \quad (Ec.7.4.)$$

### 7.3. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida B

En la formulación del balance de materiales por componente en Masa Cocida B, se utiliza la Figura 5.1, en la que se representa el equipo etiquetado como MCB en la que se muestran los flujos de materiales que entran y salen de este equipo.

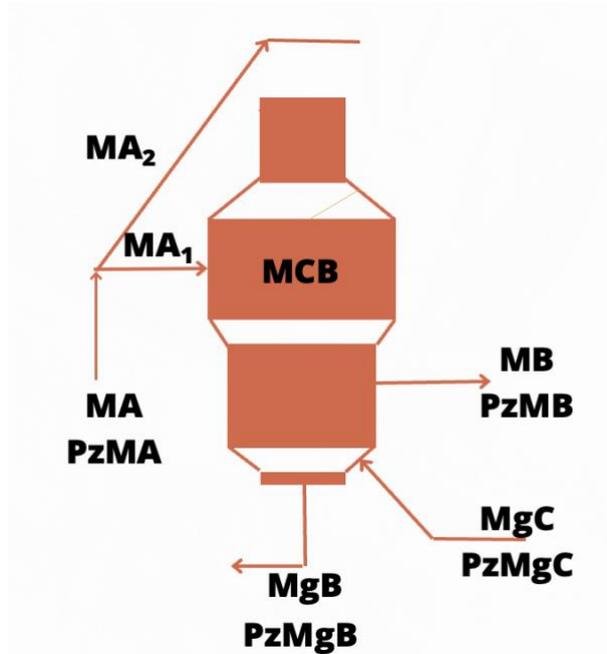


Figura 7.3. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida B

Se formuló el balance global por componentes tanto para los sólidos solubles como para el contenido de sacarosa presente en la Miel A1, Magma C, Miel B, y Magma B, usando las Ecuaciones 7.5 y 7.6, respectivamente.

Balance de sólidos

$$MA_1 + MgC = MB + MgB \quad (\text{Ec.7.5})$$

Balance de sacarosa:

$$PzMA * MA_1 + PzMgC * MgC = PzMB * MB + PzMgB * MgB \quad (\text{Ec.7.6})$$

#### 7.4. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida C

En la formulación del balance de materiales por componente en Masa Cocida C, se utiliza la Figura 5.1, en la que se representa el equipo etiquetado como MCC en la que se muestran los flujos de materiales que entran y salen de este equipo.

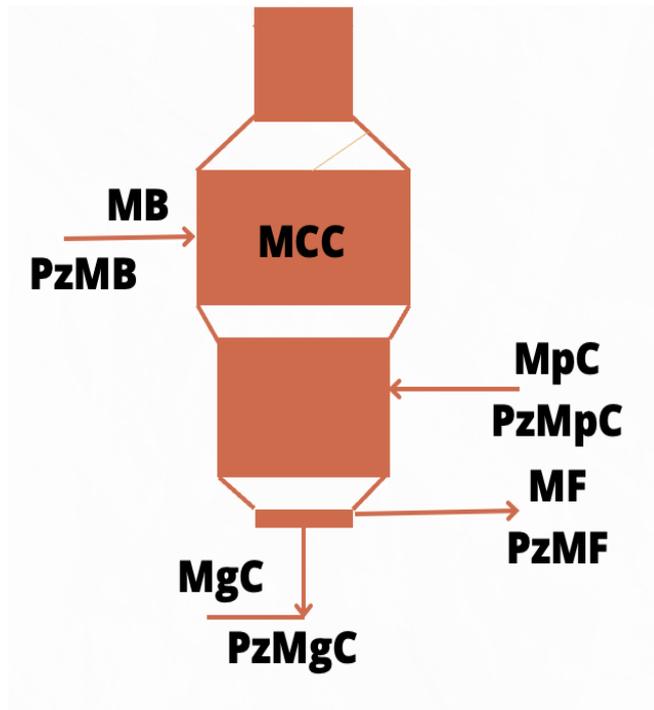


Figura 7.4. Balance de materiales por componentes en Masa Cocida C

Se formuló el balance global por componentes tanto para los sólidos solubles como para el contenido de sacarosa presentes en la Miel B, Miel al pie de C, Miel final y Magma C, usando las Ecuaciones 7.7 y 7.8, respectivamente.

Balance de sólidos:

$$MB + MpC = Mf + MgC \quad (\text{Ec.7.7})$$

Balance de sacarosa

$$PzMB*MB + PzMpC*MpC = PzMf*Mf + PzMgC*MgC \quad (\text{Ec.7.8})$$

### 7.5. Balance de materiales por componente para Mezcla de Cristalización.

En la formulación del balance de materiales por componente para Mezcla de Cristalización, se utiliza la Figura 5.1, en la que se representa el equipo etiquetado como Mezcla para cristalización, nombrado también como Semillero, en la que se muestran los flujos de materiales que entran y salen de este equipo.

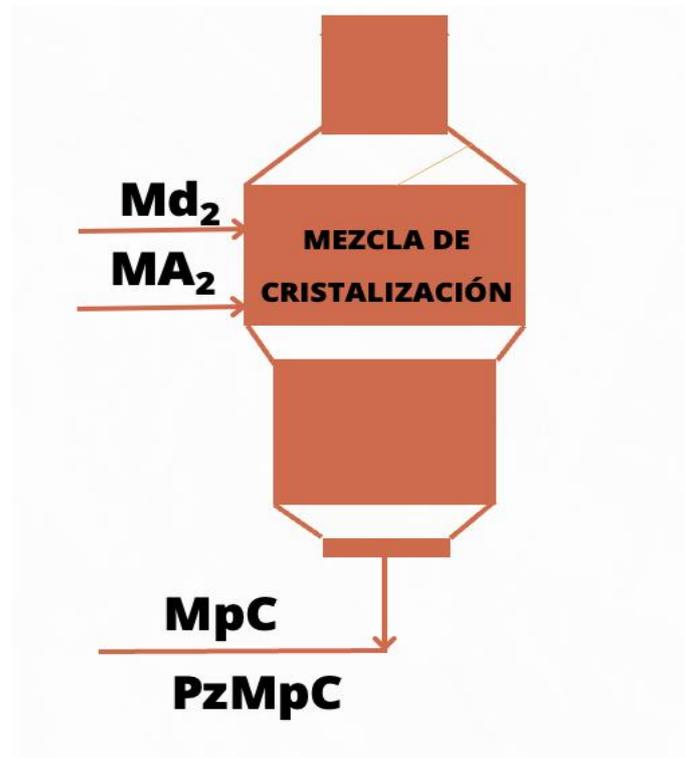


Figura 7.5. Balance de materiales por componente para Mezcla de Cristalización.

Se formuló el balance global por componentes tanto para los sólidos solubles como para el contenido de sacarosa presentes en la Miel final, Miel A2 y Miel al pie de C, usando las Ecuaciones 7.9 y 7.10, respectivamente.

Balance de sólidos:

$$Md_2 + MA_2 = MpC \quad (\text{Ec.7.9})$$

Balance de sacarosa:

$$PzMd * Md_2 + PzMA * MA_2 = PzMpC * MpC \quad (\text{Ec.7.10.})$$

## **7.6. Modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur**

El modelo matemático, que describe el proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento en la Compañía Azucarera del Sur y que se ha utilizado para simular los procesos de cristalización para determinación de sólidos solubles y sacarosa contenidos en meladura, azúcar y miel final, está compuesto por un sistema de ecuaciones lineales obtenido a partir de los balances materiales de los procesos de cocción que ocurren en cada equipo de cocción de las respectivas masas. A continuación, se detallan:

### **i) Balance general de materiales para sólidos solubles y sacarosa contenidos en la meladura, azúcar y miel final.**

$$Az + Mf = Md \quad (\text{Ec.7.1})$$

$$PzAZ * Az + PzMf * Mf = PzMd * Md \quad (\text{Ec.7.2})$$

### **ii) Balance de materiales para Masa de Cocimiento A**

$$- Az - MA_1 - MA_2 + Md_1 + MgB = 0 \quad (\text{Ec.7.3})$$

$$- PzAZ * Az - PzMA * MA_1 - PzMA * MA_2 + PzMd * Md_1 + PzMgB * MgB = 0 \quad (\text{Ec.7.4})$$

### **iii) Balance de materiales para Masa de Cocimiento B**

$$MA_1 - MB - MgB + MgC = 0 \quad (\text{Ec.7.5})$$

$$PzMA * MA_1 - PzMB * MB - PzMgB * MgB + PzMgC * MgC = 0 \quad (\text{Ec.7.6})$$

### **iv) Balance de materiales para Masa de Cocimiento C**

$$MB - Mf - MgC + MpC = 0 \quad (\text{Ec.7.7})$$

$$PzMB * MB - PzMf * Mf - PzMgC * MgC + PzMpC * MpC = 0 \quad (\text{Ec.7.8})$$

### **v) Balance de materiales para Mezcla de Cristalización**

$$MA_2 + Md_2 - MpC = 0 \quad (\text{Ec.7.9})$$

$$PzMA * MA_2 + PzMd * Md_2 - PzMpC * MpC = 0 \quad (\text{Ec.7.10})$$

En las que se tienen como incógnitas las siguientes variables: Az, MA<sub>1</sub>, MA<sub>2</sub>, MB, Md<sub>1</sub>, Md<sub>2</sub>, Mf, MgB, MgC, MpC, que corresponden a los valores de los sólidos solubles recuperables.

El modelo matemático se complementa con las siguientes ecuaciones,

$$SAz = PzAZ * Az \quad (\text{Ec.7.11})$$

$$SMA_1 = PzMA * MA_1 \quad (\text{Ec.7.12})$$

$$SMA_2 = PzMA * MA_2 \quad (\text{Ec.7.13})$$

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

$$SMB = PzMB * MB \quad (\text{Ec.7.14})$$

$$SMd_1 = PzMd * Md_1 \quad (\text{Ec.7.15})$$

$$SMd_2 = PzMd * Md_2 \quad (\text{Ec.7.16})$$

$$SMf = PzMf * Mf \quad (\text{Ec.7.17})$$

$$SMgB = PzMgB * MgB \quad (\text{Ec.7.18})$$

$$SMgC = PzMgC * MgC \quad (\text{Ec.7.19})$$

$$SMpC = PzMpC * MgpC \quad (\text{Ec.7.20})$$

Estas relaciones, se emplean para determinar el contenido de sacarosa presente en tiempo real en cada equipo de cocción, el cual se establece de acuerdo, al porcentaje de pureza determinado en laboratorio y los valores correspondientes a los sólidos suspendidos determinados al encontrar la solución del sistema de ecuaciones expresado con las (Ec.7.1.) hasta la (Ec.7.10).

El análisis y diseño del Módulo de simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento, con aplicación de las técnicas de la Ingeniería del Software, se presenta en el Anexo III.

### **7.7. Método de solución de sistema de ecuaciones simultáneas lineales del Modelo Matemático y Simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.**

Se ha utilizado para resolver el sistema de ecuaciones lineales el Complemento Solver de Excel de Microsoft 2013, procedimiento que se detalla en el Anexo IV.

En esta sección se presentan los elementos integrantes del procedimiento para la solución de los sistemas de ecuaciones lineales, que se ha conformado a partir de las ecuaciones de balance de masa para sólidos solubles y sacarosa contenidas en la meladura, mieles y masas cocidas.

Los componentes son:

- El porcentaje de pureza del contenido de sacarosa presente en cada uno de los componentes: Meladura, Azúcar, Mieles de Masa Cocida A, B, C, Semillero y Mieles Finales.
- Las celdas, que contienen los valores de las incógnitas, que varían hasta encontrar los valores correspondientes que satisfacen a la vez, la condición establecida para la celda objetivo y para el conjunto de restricciones a las que está sometido el modelo matemático que simula el sistema de tres masas cocidas con doble magma.
- La matriz de coeficientes de las incógnitas
- El vector columna de términos independientes

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

- El vector columna de restricciones, que deberán ser satisfecha por los valores encontrados para todas y cada una de las incógnitas.

La matriz de interacción usada por el Solver de Excel se presenta en la Figura 7.6.

Celdas variables									
Az	MA1	MA2	MB	Md1	Md2	Mf	MgB	MgC	MpC

Incógnitas										Términos Indep.	Resultado
Az	MA1	MA2	MB	Md1	Md2	Mf	MgB	MgC	MpC		
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	- Md	Celda Objetivo
$Pz_{AZ}$	0	0	0	0	0	$Pz_{Mf}$	0	0	0	$- Pz_{Md} * Md$	Restricción
-1	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	Restricción
$-Pz_{AZ}$	$-Pz_{MA}$	$-Pz_{MA}$	0	$Pz_{Md}$	0	0	$Pz_{MgB}$	0	0	0	Restricción
0	1	0	-1	0	0	0	-1	1	0	0	Restricción
0	$Pz_{MA}$	0	$-Pz_{MB}$	0	0	0	$-Pz_{MgB}$	$Pz_{MgC}$	0	0	Restricción
0	0	0	1	0	0	-1	0	-1	1	0	Restricción
0	0	0	$Pz_{MB}$	0	0	$- Pz_{Mf}$	0	$- Pz_{MgC}$	$Pz_{MpC}$	0	Restricción
0	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	0	Restricción
0	0	$Pz_{MA}$	0	0	$Pz_{Md}$	0	0	0	$-Pz_{MpC}$	0	Restricción

**Figura 7.6. Matriz de Interacción de Solver en Excel para resolver el sistema de ecuaciones del Modelo Matemático y Simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.**

**Capítulo 8: Análisis y discusión de resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización.**

**8.1. Resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimientos.**

Los datos Iniciales para simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento, se presentan en la Tabla 8.1. Estos, proceden del área de molienda y del área de laboratorios del control de la producción. Se conoce el flujo másico de Meladura que entra a casa de cocimientos que es de 727.50 Tn/día y el porcentaje de pureza de sacarosa contenida en cada masa cocida y en mieles.

**Tabla 8.1.- Datos Iniciales para simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento**

Componente	Azúcar	Miel A		Miel B	Meladura		Miel Final	Magma B	Magma C	MpieCrist AI
		Ma 1	Ma 2	Mb	Md 1	Md 2	Mf	MgB	MgC	MpC
Pureza (%)	0.9956	0.70	0.70	0.58	0.86	0.86	0.31	0.96	0.88	0.80
Sólidos (Tn/día)	x	x	x	x	727.50		x	x	x	x
Sacarosa (%)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Como se ha establecido la tarea a resolver consiste en determinar la cantidad de sólidos solubles recuperables y la cantidad de sacarosa presente en cada etapa del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento, para tal fin se ha hecho uso de la herramienta del Componente Solver de Excel para resolver el sistema de ecuaciones que conforman el modelo matemático para simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento. Esta matriz de interacción se presenta en la Figura 8.1. El proceso de solución se explica ampliamente en la Sesión 7.7 y en el Anexo IV.

En la Tabla 8.2, se presentan los resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento. Con estos resultados se procedió a determinar además el contenido de sacarosa presente en cada componente en casa de cocimiento y se procedieron a formular los balances de masas de sólidos solubles recuperables y de contenido de sacaros para cada componente en casa de cocimientos. Estos balances de masas se presentan en las Tablas 8.3 y 8.4, correspondientemente.

**Tabla 8.2.- Resultados de la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.**

Componente	Azúcar	Miel A		Miel B	Meladura		Miel Final	Magma B	Magma C	MpieC
Identificador	Az	Ma1	Ma2	Mb	Md1	Md2	Mf	MgB	McC	MpC
Pureza (%)	0.9956	0.70	0.70	0.58	0.86	0.86	0.31	0.96	0.88	0.80
Sólidos (Tn/día)	583.61	158.41	122.67	186.15	523.05	204.45	143.89	341.65	369.39	327.13

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

Sacarosa(Tn/día)	581.04	110.89	85.87	107.97	449.82	175.83	44.61	327.98	325.06	261.70
------------------	--------	--------	-------	--------	--------	--------	-------	--------	--------	--------

Celdas variables (Solución)											
Az	MA1	MA2	MB	Md1	Md2	Mf	MgB	MgC	MpC		
583.61	158.41	122.67	186.15	523.05	204.45	143.89	341.65	369.39	327.13		
Incógnitas									Térm. Indep.	Rest.	
Az	Ma1	Ma2	MB	Md1	Md2	Mf	MgB	MgC	MpC		
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-727.5	0.00
0.9956	0	0	0	0	0	0.31	0	0	0	-625.65	0.00
-1	-1	-1	0	1	0	0	1	0	0	0	0.00
-0.9956	-0.7	-0.7	0	0.86	0	0	0.96	0	0	0	0.00
0	1	0	-1	0	0	0	-1	1	0	0	0.00
0	0.7	0	-0.58	0	0	0	-0.96	0.88	0	0	0.00
0	0	0	1	0	0	-1	0	-1	1	0	0.00
0	0	0	0.58	0	0	0.31	0	-0.88	0.8	0	0.00
0	0	1	0	0	1	0	0	0	-1	0	0.00
0	0	0.7	0	0	0.86	0	0	0	-0.8	0	0.00

**Figura 8.1. Matriz de interacción para resolver el sistema de ecuaciones del modelo matemático del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento con el Complemento Solver de Excel.**

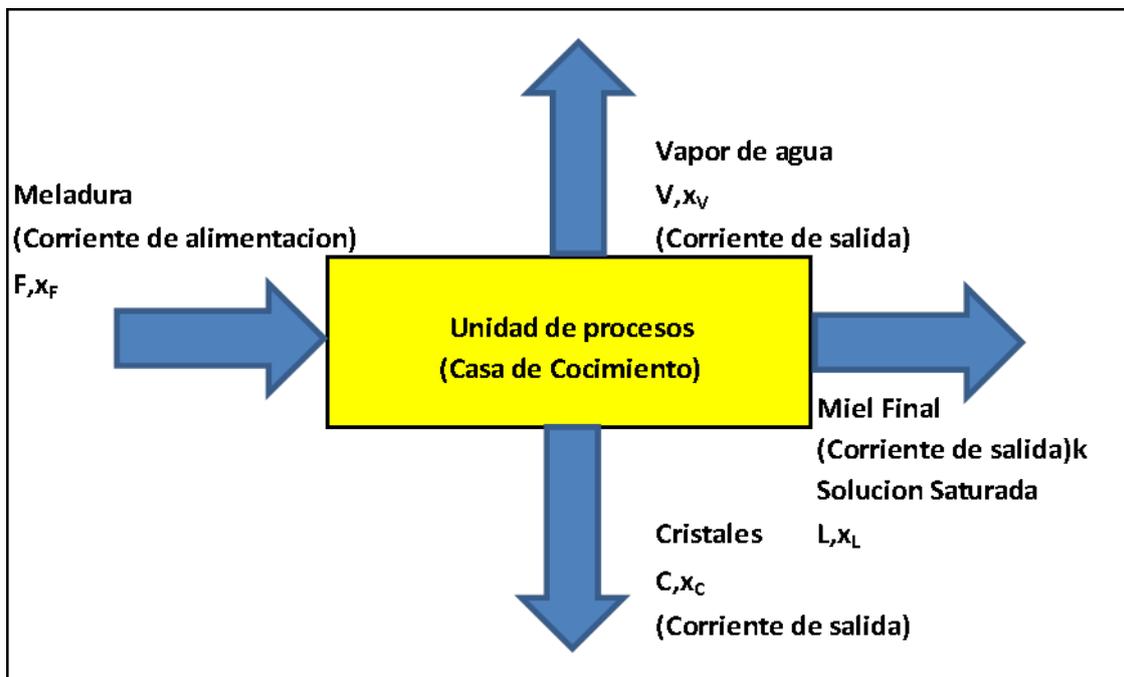
**Tabla 8.3.- Balance de masas de sólidos solubles recuperados en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.**

Entrada	Identif.	Flujo Másico (Tn/día)	%	Salida	Identif.	Flujo Másico (Tn/día)	%
Meladura que entra a Masa Cocida A	<b>Md1</b>	523.04	60.49	Azúcar	<b>Az</b>	583.61	67.49
Magma B	<b>MgB</b>	341.65	39.51	Miel A1	<b>MA1</b>	158.41	18.32
				Miel A2	<b>MA2</b>	122.67	14.19
<b>Masa Cocida A</b>		<b>864.69</b>	<b>100.00</b>			<b>864.69</b>	<b>100.00</b>
Miel A que entra a Masa cocida B	<b>MA1</b>	158.41	30.01	Miel B	<b>MB</b>	186.15	35.27
Magma C	<b>MgC</b>	369.4	69.99	Magma B	<b>MgB</b>	341.65	64.73
<b>Masa Cocida B</b>		<b>527.81</b>	<b>100.00</b>			<b>527.8</b>	<b>100.00</b>
Miel B	<b>MB</b>	186.15	36.27	Miel final	<b>Mf</b>	143.89	28.03
Mezcla de Cristalización	<b>MpC</b>	327.13	63.73	Magma C	<b>MgC</b>	369.4	71.97
<b>Masa Cocida C</b>		<b>513.28</b>	<b>100.00</b>			<b>513.29</b>	<b>100.00</b>
Meladura para pie de cristalización	<b>Md2</b>	204.45	62.50	Mezcla de Cristalización	<b>MpC</b>	327.13	100.00
Miel A para pie de Cristalización.	<b>MA2</b>	122.67	37.50				

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

<b>Mezcla de Cristalización</b>		<b>327.12</b>	<b>100.00</b>			<b>327.13</b>	<b>100.00</b>
-------------------------------------	--	---------------	---------------	--	--	---------------	---------------

En la Figura 8.2, se presenta el Balance de masas en la Unidad de procesos de Casa de Cocimiento, en el área de cristalización. En la corriente de alimentación, está ingresando un Flujo másico de 1173.38 Tn/día de jugo que contienen 727.5 Tn/día de Meladura como sólidos solubles recuperables y 445.88 Tn/día de agua que se evaporara finalmente en los evaporadores de casa de cocimientos. Por lo que al momento de formular los balances no se toma en cuenta, y solo se ha referido a los sólidos solubles recuperables presentes en la Meladura que se convierten en cristales de azúcar y mieles finales.



**Figura 8.2. - Balance de masa en la unidad de proceso – Casa de Cocimiento. Área de Cristalización.**

De la Tabla 8.3, se observa que el Tacho que contiene la Masa Cocida, ingresan 523.04 Tn/día de Meladura (  $Md_1$ ) y 341.65 Tn/día de Magma procedente del Tacho que contiene la Masa Cocida B ( $Mg_B$ ) en total están presentes 864.69 Tn/día en el equipo donde ocurre el proceso de cocción de la Masa A y salen 583.61 Tn/día de Azúcar ( $Az$ ) y 281.08 Tn/día de Miel A (  $Ma_1 + Ma_2$ ) para un total de 864.69 Tn/día que salen del equipo de Masa Cocida A.

Así mismo se observa que una parte de la Miel A (  $Ma_1$ ) que corresponde a 158.41 Ton/día y Magma procedente del Tacho que contiene Masa Cocida C ingresan al tacho en el cual ocurre la cocción de la Masa B, conteniendo un total de 527.81 Tn/día en Masa Cocida B y salen a su vez de este equipo 186.15 Tn/día de Miel B (  $Mb$ ) y 341.65 Tn/día de Magma B para un total de 527.80 Tn/día de mezcla de cristalización (  $Mp_C$ ) del tacho semillero, para un

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

total de 513.28 Tn/día contenidas en este equipo de Masa Cocida C y saliendo a su vez desde este equipo 143.89 Tn/día como miel final ( Mf) y 369.40 de Magma C (MgC)para un total de 513.29 Tn/día.

En el equipo de cocción en el que ocurre la mezcla de cristalización denominado semillero, ingresan 204.45 Tn/día de Meladura (Md2) y 122.67 Tn/día de Miel A (Ma2) para un total de 327.12 Tn/día de Mezcla de cristalización, igual cantidad de 327.13 Tn/día, egresa de este equipo como mezcla de cristalización (MpC).

Con relación a los resultados del Balance de masas de sacarosa recuperada en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento, en la Tabla 8.4, se observa que al sistema ingresan un flujo másico de 625.65 Tn/día de sacarosa contenidas en la Meladura ( Md1+Md2) que se convierte y salen del sistema de cocimiento como sacarosa contenida en Azúcar (Az) con un flujo másico de 581.04 Tn/día y 44.61 Tn/día como mieles finales (Mf).

**Tabla 8.4.- Balance de masas de sacarosa recuperada en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.**

Entrada	Identif.	Flujo Másico (Tn/día)	%	Salida	Identif.	Flujo Másico (Tn/día)	%
Meladura que entra a Masa Cocida A	Md1	449.81	57.83	Azúcar	Az	581.04	74.70
Magma B	MgB	327.98	42.17	Miel A1	MA1	110.89	14.26
				Miel A2	MA2	85.87	11.04
<b>Masa Cocida A</b>		<b>777.80</b>	<b>100.00</b>			<b>777.80</b>	<b>100.00</b>
Miel A que entra a Masa cocida B	MA1	110.89	25.44	Miel B	MB	107.97	24.77
Magma C	MgC	325.07	74.56	Magma B	MgB	327.98	75.23
<b>Masa Cocida B</b>		<b>435.96</b>	<b>100.00</b>			<b>435.95</b>	<b>100.00</b>
Miel B	MB	107.97	29.21	Miel final	Mf	44.61	12.07
Mezcla de Cristalización	MpC	261.70	70.79	Magma C	MgC	325.07	87.94
<b>Masa Cocida C</b>		<b>369.67</b>	<b>100.00</b>			<b>369.68</b>	<b>100.00</b>
Meladura para pie de Cristalización	Md2	175.83	67.19	Mezcla de Cristalización	MpC	261.70	100.00
Miel A para pie de cristalización	MA2	85.87	32.81				
<b>Mezcla de Cristalización</b>		<b>261.70</b>	<b>100.00</b>			<b>261.70</b>	<b>100.00</b>

De conformidad con este sistema de Masas cocida se tiene que en el equipo de **Masa cocida A**, ingresa un flujo másico de sacarosa de 777.80 Tn/día de los cuales 449.81 Tn/día corresponden a Meladura (Md1) y 327.98 Tn/día de Magma (MgB) procedentes del equipo de Masa Cocida B. Así mismo egresan 581.04 Tn/día de sacarosa contenida en Azúcar (Az) y 196.76 Tn/día de sacarosa contenida en Miel A (Ma1+Ma2). En tanto en el sistema de **Masa cocida B**, ingresan dos corrientes de flujos másicos de sacarosa contenidas en Magma C (MgC) de 325.07 Tn/día y Miel A (Ma1) de 110.89 Tn/día, para un flujo másico total de 435.96 Tn/día de sacarosa, y egresan dos corrientes, una de Miel B (MB) de 107.97 Tn/día y una segunda de Magma B (MgB) de 327.98 Tn/día.

En el sistema de **Masa cocida C**, ingresan dos corrientes de sacarosa con un flujo másico total de 369.67 Tn/día, divididos en una corriente de Miel B (MB) de sacarosa de 107.97 Tn/día y otra de Mezcla de Cristalización (MpC) de sacarosa de 261.70 Tn/día, egresando como Miel Final (Mf) un flujo de 44.61 Tn/día y una segunda corriente de Magma C (MgC) de 325.07 Tn/día.

Al equipo conocido como **Semillero** en el que se da la Mezcla de Cristalización, ingresa un flujo másico de 261.70 Tn/día de sacarosa, compuesto por una corriente de Meladura (Md2) de 175.83 Tn/día y Miel A (Ma2) de 85.87 Tn/día y egresa una sola corriente de Mezcla de Cristalización de 261.70 Tn/día de sacarosa.

## **8.2. Eficiencia teórica del proceso de cristalización**

Por medio del balance de materia del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y en el área de cristalización, que han ingresado al sistema de cocimiento 625.25 Tn/día de sacarosa contenidas en la Meladura de las cuales 581.04 Tn/día corresponde a Azúcar y 44.61 Tn/día corresponde a Miel final. Estas Miel final son consideradas residuos de la producción de azúcar, por lo que la eficiencia teórica de la producción de azúcar en el área de cristalización es:

$$\text{Eficiencia teórica} = (581.04 \text{ Tn/día}) / (625.25 \text{ Tn/día}) * 100 = 92.87 \%$$

El porcentaje de sacarosa, presente en miel final no recuperable, es:

$$\% \text{ Sacarosa Mf.} = (44.61 \text{ Tn/día}) / (625.25 \text{ Tn/día}) * 100 = 7.13 \%$$

Por tal razón la miel final es considerada como un factor de pérdida de la producción de azúcar.

### **8.3. Resultados del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento del área de cristalización**

Conforme el balance de masas en la unidad de procesos de casa de cocimiento del área de cristalización, en la corriente de alimentación, ha ingresado un flujo másico de 1173.38 Tn/día de jugo que contienen 727.5 Tn/día de Meladura como sólidos solubles recuperables y 445.88 Tn/día de agua que se evaporara finalmente en los evaporadores de casa de cocimientos, razón por la cual al momento de formular los balances de masa no se toma en cuenta, y solo se ha referido a los sólidos solubles recuperables presentes en la meladura que se convierten en cristales de azúcar y mieles finales.

Los resultados del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento del área de cristalización se presentan en la Tabla 8.5

**Tabla 8.5.- Resultados del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento del área de cristalización**

<b>Entrada</b>	<b>Identif.</b>	<b>Flujo Másico (Tn/día)</b>	<b>%</b>	<b>Salida</b>	<b>Identif.</b>	<b>Flujo Másico (Tn/día)</b>	<b>%</b>
Meladura	Md	1173.38	100	Azúcar	Az	583.61	49.74
				Miel Final	Mf	143.89	12.26
				Agua evaporada	Agua evaporada	445.88	38.00
<b>Totales</b>		<b>1173.38</b>				<b>1173.38</b>	<b>100.00</b>

Se tienen entonces, 583.61 Ton de Azúcar, que pueden empacarse en 11,672 sacos de 50 Kg, además de 143.89 Tn de mieles finales.

### **8.4.- Resultados de la determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

En los Anexos V y VI, se presentan los procedimientos aplicados para la determinación de las capacidades volumétricas de tanques, cristalizadores y tachos y equipos para recepción y almacenamiento de meladura, mieles, masas cocidas, crecimiento de semilla, en el stock de materiales del área de cristalización, así como las cantidades de estos materiales contenidos en ellos.

Los valores de densidad de cada material, así como sus concentraciones en % Pol y °Bx, se rede terminaron en el Laboratorio de control técnico de la producción.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.6.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

**Tabla 8.6.- Resultados de la determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

Componente	V m3	D Kg/m3	Pol %	Conc. °Bx	Materiales en Stock-Área de Cristalización		
					Sólidos Solubles, Tn	Sacarosa Tn	Mieles Finales, Tn
Meladura	135.22	1.25	54.26	48.48	82.07	44.53	37.54
Miel A	86.53	1.37	73.22	58.49	69.16	50.64	18.52
Miel B	114.72	1.41	79.68	48.86	78.92	62.89	16.04
Magma B	17.57	1.49	92.10	88.23	23.16	21.33	1.83
Magma C	18.39	1.48	90.35	79.83	21.74	19.64	2.10
Semillero 1RA	18.39	1.44	85.00	75.12	19.95	16.96	2.99
Semillero 2DA	18.39	1.41	80.03	75.12	19.48	15.59	3.89
Semillero 3RA	29.25	1.47	88.49	62.90	27.00	23.90	3.11
Masa Cocida A	151.02	1.48	90.40	80.90	181.04	163.66	17.38
Masa Cocida B	77.45	1.49	91.49	74.05	85.39	78.13	7.27
Masa Cocida C	280.00	1.51	95.27	60.69	257.36	245.19	12.17
<b>Totales</b>					865.28	742.45	122.84
<b>Pza Az:=</b>	<b>85.80</b>	%					
<b>PzaMf:=</b>	14.20	%					
<b>Pza Promedio=</b>	83.94	%					
<b>Peso_Azucar =</b>	742.45	Tn/día					
<b>Peso_Azucar =</b>	7424.5	qq					

En el stock de materiales del área de cristalización se tiene un total de 865.28 Tn de sólidos solubles recuperables, cuya Pureza promedio es de 83.94 %, los que contienen 742.45 Ton de Azúcar, con una Pureza de 85.80 %, que corresponden a 7424.5 qq o 14,849 sacos de 50 Kg. Así mismo se tienen 122.84 Tn de mieles finales, correspondiendo a 2.17 % de sacarosa que no se ha podido recuperar, presente en las mieles finales. La eficiencia de recuperación de sacarosa ha sido de 85.8%.

En la Tabla 8.7, se presenta el total de las cantidades de materiales que se contienen en los flujos de entradas y salidas tanto en el proceso que ocurre en casa de cocimiento como en el stock de materiales.

Se observa que la eficiencia global de recuperación de Azúcar es del 83.25 %, con una corriente de salida de 1326.05 Tn., equivalentes a 29,239 qq de azúcar o 26,521 sacos de 50 Kg con 266.63 Tn de mieles finales correspondiente estas a un 16.75 %.

Con relación a la sacarosa presente en el azúcar se tiene que contiene 1307.40 Ton, con un 95.56 de pureza y un 60.70 Tn de mieles finales que corresponden a un 4.44 %.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

**Tabla 8.7.- Eficiencias globales de recuperación de azúcar y sacarosa el proceso de producción en casa de cocimiento y en el stock de materiales del área de cristalización.**

Componente	Entra	Sale		Total
	Meladura Tn	Azúcar Tn	Mf Tn	Tn
<b>Proceso</b>				
Sólidos solubles	727.49	583.61	143.89	727.5
		80.22	19.78	
<b>Sacarosa</b>	<b>625.64</b>	<b>581.04</b>	<b>44.61</b>	<b>625.65</b>
		<b>92.87</b>	<b>7.13</b>	
<b>Stock</b>				
Sólidos solubles	865.28	742.44	122.84	865.28
		85.80	14.20	
<b>Sacarosa</b>	<b>742.45</b>	<b>726.36</b>	<b>16.09</b>	<b>742.45</b>
		<b>97.83</b>	<b>2.17</b>	
<b>Proceso +Stock de materiales</b>				
Sólidos solubles	1592.77	1326.05	266.73	1592.78
		83.25	16.75	
<b>Sacarosa</b>	<b>1368.09</b>	<b>1307.40</b>	<b>60.70</b>	<b>1368.10</b>
		<b>95.56</b>	<b>4.44</b>	

## **Capitulo IX: Conclusiones**

1.- La Compañía Azucarera, emplea un esquema de tres etapas de cristalización, de tres plantas, que consta de un sistema de tres masas cocidas con doble magma. Compuesto por las siguientes etapas y/o estaciones:

- (i) Estación de tanques de meladura y mieles
- (ii) Estación de Tachos, recibidores masas cocidas, semilleros y cristalizadores
- (iii) Estación de centrifugas de masas cocida A, B, y C
- (iv) Secado y Empacado.

Los procesos de cocimiento y cristalización del azúcar ocurren en las estaciones (i) y (ii) en los que la meladura que contiene los sólidos solubles recuperables se transforma en azúcar y mieles finales. La estación (iii), es una etapa intermedia, en la cual el material pasa de tránsito en las centrifugas, donde ocurre la separación de materiales en azúcar y mieles. La estación (iv), de igual forma no altera el balance de sólidos solubles y de sacarosa, es una etapa en la que se elimina la humedad, la cual se ha considerado en el balance global como vapor de agua.

2. Los parámetros que gobiernan los procesos y operaciones determinantes en la producción de azúcar en el área de cocción y cristalización y de importancia para la investigación realizada han sido los siguientes:

- a) Las sustancias de trabajo que participan en las diferentes etapas del proceso de producción de azúcar y cristalización y sus flujos másicos, (Tn/día) , entre los que están : Meladura (Md), Azúcar (Az), Miel A(MA), Miel B(MB), Miel Final(Mf), Magma B (MgB), Magma C (MgC), Masas Cocida A (MCA), Miel para mezcla de cristalización (MpC), Masa Cocida B( MCB) y Masa Cocida C(MCC) y Sacarosa.
- b) Propiedades fisicoquímicas de los componentes que determinan su calidad:
  - Grados Brix del Jugo,
  - Grados POL (Porcentaje POL),
  - Coeficiente de Pureza

3.- El modelo matemático que describe el proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento está compuesto por un sistema de ecuaciones lineales en las que participan como incógnitas los flujos másicos (Tn/día) de los siguientes componentes: Meladura (Md1, Md2), Azúcar (Az), Miel A(Ma1, Ma2) Miel B(MB), Miel Final(Mf), Magma B (MgB), Magma C (MgC) y Miel para mezcla de cristalización (MpC), el cual se obtuvo al formular los balances de masa globales y los balances de masa por componentes. Con los datos obtenidos como solución permite establecer además los flujos másicos para Masa Cocida A (MCA), Masa Cocida B( MCB) y Masa Cocida C(MCC), aporte de Sacarosa por componente y la eficiencia teórica del proceso de recuperación de Sacarosa a partir de los sólidos solubles contenidos en la Meladura.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

4.- El proceso de simulación inicio con la alimentación de los datos de entrada relacionados con la corriente de alimentación de Meladura con un flujo másico de 1173.38 Ton/día que contiene agua y sólidos solubles recuperables, así como también los datos de pureza relacionados con el contenido de sacarosa de cada uno de los componentes que se producen en el sistema de cocimiento

Los resultados obtenidos en este proceso de simulación presentan que al sistema de cocimiento ingresa un flujo másico de jugo de caña de 1173.38 Ton/día que contiene agua y sólidos solubles recuperables, teniendo como productos en su salida 445.88 Tn/día de agua que es evaporada durante la operación de cocimiento, se recuperan 583.61 Tn/día de Azúcar y 143.89 Tn/día de Mieles Finales. Se tiene que en el sistema de cocimiento, se procesan los siguientes materiales: 777.80 Tn/día de Masa Cocida A, 435.96 Tn/día de Masa Cocida B, 369.68 Tn/día de Masa Cocida C y 261.70 de Mezcla de Cristalización. Se recuperan 581.04 Tn/día de 625.25 Tn/día de Sacarosa que están presentes en la Meladura para una eficiencia teórica de recuperación del 92.87 %. Con una producción de 11672 qq/día de Azúcar.

En el stock de materiales del área de cristalización se tiene un total de 865.28 Tn de sólidos solubles recuperables, que contienen 742.45 Ton de Azúcar, que corresponden a una producción de 16,371 qq. La eficiencia de recuperación de sacarosa ha sido del 85.80 %. Así mismo se tienen 122.84 Tn de mieles finales, correspondiendo a 14.20 % de sacarosa que no se ha podido recuperar.

En total tanto en proceso como en el stock del área de cristalización se tienen 1592.77 Tn de sólidos solubles recuperables. La eficiencia global de recuperación de Azúcar es del 83.25 %, con 1326.05 Tn, correspondientes a 29,239 qq de azúcar y 266.73 Tn de mieles finales, con 16.75 % de azúcar no recuperable, pero comercializable como Melaza. Con relación a la sacarosa presente en el azúcar se tiene que contiene 1307.40 Ton, que representa una eficiencia global de recuperación de sacarosa de 95.56 % y perdidas de sacarosa en mieles finales de 60.70 Tn de mieles finales que corresponden a un 4.44 %.

## **Capitulo X: Recomendaciones**

- El modelo matemático es un sistema de ecuaciones lineales, en las que predominan las ecuaciones homogéneas con características especiales y una tendencia a tener múltiples soluciones, la mayoría de ellas, no corresponden con el modelo físico del proceso de cocimiento de masas en el área de cristalización. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones lineales debe establecer restricciones justamente para obtener a su vez la solución que optimiza los resultados del modelo matemático en correspondencia con el modelo físico.
- Los resultados de eficiencia de recuperación tanto de Azúcar, como de Sacarosa pueden ser utilizados durante el proceso de cocimiento y demás etapas de la producción de azúcar para la implementación de técnicas que mejoren esta misma eficiencia obteniendo así un azúcar de mayor pureza y por ende de mejor calidad para su comercialización.
- Se recomienda tener un mejor control sobre los parámetros operacionales y pureza de los flujos de materiales que se procesan en la Masa Cocida A, dado aquí es donde se produce el producto objetivo del proceso que es el Azúcar
- Los resultados obtenidos, manifiestan la importancia de los balances de masa de los sólidos recuperables y balance de sacarosa, para controlar el proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y mejorar la eficiencia del área de cristalización, de tal manera que se puedan ajustar en tiempo real, las desviaciones del proceso y por ende mejorar la eficiencia de recuperación de sólidos solubles y del proceso de producción en general.
- Esta herramienta informática y sus resultados, basada en la formulación de los balances de masa del área de cristalización y casa de cocimiento, determinan la cantidad de azúcar contenidas en las mieles, magmas y semillas presentes en casa de cocimiento, de tal forma que permite al responsable de fabricación realizar un diagnóstico de manera rápida y eficiente para el área de cristalización; lo cual ayudará a agrupar y clasificar, puntos críticos que influyen tanto en la calidad del azúcar como en el mejoramiento del proceso.
- La identificación y agrupación de estos puntos críticos del proceso de cristalización, podrá determinar el grado de incidencia de cada uno de ellos y así realizar una evaluación del rendimiento del proceso u optimización, teniendo un control de mejor efectividad y eficacia en el proceso de producción en casa de cocimiento y cristalización.

## **XI.- Bibliografía**

1. Antonio, F.(2003). **Cálculos en la industria de la Caña de Azúcar.** Sao Pablo. 2ª Edición. Editorial STAB.
2. Bolaños, E. (2013). **Recuperación de Sólidos de Ingenios en Costa Rica.** San José. Ediciones LAICA.
3. Chen C.P.( 1991). **Manual de la producción de azúcar.** Mexico. Editorial Limusa.
4. Clark, J.(1970). **Proceso de fabricación de azúcar en los tachos.** Ciudad Habana. Editorial del Pueblo.
5. Domínguez, J. (2003). **Agotamiento de Mieles en la Industria Azucarera.** Matanzas. Universidad de Matanzas.
6. Heizer, J. &Render, B. (2004). **Principios de administración de operaciones.** Quinta edición. México. Pearson Educación.
7. Hugot, E.(1986). **Manual de la Ingeniería de la caña de azúcar.**Amsterdan. 3ª Edición. Elsevier Publisher.
8. Kendall, K & Kendall, E. (2005). **Análisis y Diseño de Sistemas.** México. Sexta Edición. Pearson Educación.
9. Lopez,F. (1969). **El proceso de fabricación de azúcar crudo en los tachos.** La Habana. Editorial Revolucionaria.
10. Nocado, I & Caballero, A. (1963). **La calidad del azúcar y su comercialización.** Ciudad Habana. Instituto Cubano del Azucar.
11. Rein, P. (2007). **Ingeniería de la caña de azúcar.** Berlin. Bartens KG Publisher.
12. Spencer, G. (1998). **Manual de azúcar de Caña y Químicos Azucareros.** Nueva York. Séptima Edición. John Wiley & Son.
13. Tellows,P.(1994). **Tecnología del Procesado de los Alimentos, Principios y Prácticas.** Madrid. Editorial Acribia, S.A.
14. Weininger, S.( 1998). **Química Organica.** Barcelona. Editorial Reverte.

## **Índice de Anexos**

	<b>Página</b>
<b>Anexo I:</b> Guía de Entrevista Semiestructurada	i
<b>Anexo II:</b> Glosario.	ii
<b>Anexo III:</b> Aplicación de las técnicas de la Ingeniería del Software para el desarrollo del modelo matemático y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento con asistencia de Excel.	v
<b>Anexo IV:</b> Procedimiento para resolver sistemas de ecuaciones lineales usando el complemento Solver de Excel de Microsoft 2013.	xi
<b>Anexo V:</b> Procedimientos de cálculos de la capacidad volumétrica de tanques para almacenamiento de meladura, mieles, masas cocidas, crecimiento de semilla, cristalizadores y tachos.	xv
<b>Anexo VI:</b> Desarrollo del algoritmo para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.	xxiv

**Anexo I: Guía de Entrevista Semiestructurada**

**Nombre del Entrevistado:** \_\_\_\_\_

**Profesión:** \_\_\_\_\_

**Cargo** \_\_\_\_\_ **en** \_\_\_\_\_ **la** \_\_\_\_\_ **Empresa:** \_\_\_\_\_

**Años** \_\_\_\_\_ **de** \_\_\_\_\_ **experiencia** \_\_\_\_\_ **en** \_\_\_\_\_ **el** \_\_\_\_\_ **cargo:** \_\_\_\_\_

**Fase Exploratoria**

- 1.- Saludo Cordial
- 2.- Delimitar el motivo de la entrevista
- 3.- Obtener los datos sobre la naturaleza del problema

**Fase Informativa**

- 1.- ¿Cuál es la función del área de cristalización?
- 2.- ¿Cuáles procesos se ejecutan en esta área para la producción de azúcar?
- 3.- ¿Cuáles operaciones se ejecutan en esta área para la producción de azúcar?
- 4.- ¿Cuál es su secuencia de ejecución?
- 5.- ¿Cuáles son los equipos, accesorios y maquinaria en que ocurren estos procesos y operaciones?
- 6.- ¿Cuáles son sus características técnicas?
- 7.- ¿Cuáles son las variables de estados que gobiernan estos procesos y operaciones?
- 8.- ¿Cuáles son los valores operacionales de estas variables de estado?
- 9.- ¿Cuáles sustancias y que propiedades se necesitan controlar en el proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización?
- 10.- ¿Cuáles son las magnitudes de los flujos de materiales, subproductos y productos obtenidos en los distintos procesos y operaciones que ocurren en el proceso de producción de azúcar en el área de cocción y cristalización y que son de interés para la conformación del inventario del área de cristalización, abarcando también el stock de azúcar?

**3.- Cierre de la entrevista**

Agradecimiento

Despedida.

**Anexo II: Glosario.**

- 1) **Azúcar:** Producto final obtenido específicamente del proceso de la caña de azúcar en un Ingenio.
- 2) **Azúcar A:** Producto principal de producción; se obtiene de las centrifugas al separar el azúcar contenido en la Masa Cocida A, Debe de reunir todos los requisitos de calidad de estándar internacional siguientes: Humedad = 0.06, Pol = 99.50-99.56, Color = 250 - 300 IS, Tamaño cristal = 500 – 600 Micrones
- 3) **Azúcar B:** Este subproducto se obtiene de las centrifugas separando el azúcar que se encuentra en la Masa Cocida B se mezcla con pequeñas proporciones de agua o con jugo clarificado, obteniéndose de esta manera la magma B.
- 4) **Azúcar C:** Este subproducto se obtiene de las centrifugas en la separación del azúcar que existe en la Masa Cocida C; al mezclarse con pequeñas proporciones de agua o con jugo clarificado, se obtiene magma C.
- 5) **Cristalización:** Proceso en el que se transforma parte de la sacarosa de fase líquida a fase sólida.
- 6) **Casa de cocimiento:** Área donde se procesa producto concentrado azucarado en forma de jarabe llamado meladura que se recibe del área de evaporación para producir masa cocidas de las cual se obtienen azúcar y mieles para reproceso y dos productos finales; azúcar comercial de alta calidad y melaza.
- 7) **Eficiencia de Casa de Cocimiento:** Recobrado en Casa de Cocimiento.
- 8) **Fluctuación del proceso:** Movimiento del Stock en un determinado periodo de tiempo ( 24 horas), que determina si aumenta o disminuye la cantidad de azúcar en proceso.
- 9) **Grados Brix (Bx):** Es la proporción de sólidos solubles disueltos por cada cien partes de una solución.
- 10) **Hidrólisis de la sacarosa:** Es la reacción química de descomposición de la sacarosa expuesta a altas temperatura y en medio ácido convirtiéndose en glucosa y fructosa; este proceso se conoce como inversión de la sacarosa; al resultado (glucosa y fructosa) como azúcares reductores.
- 11) **Ingenio:** Fabrica donde se procesa caña de azúcar para producir azúcar como producto principal y melaza como subproducto.
- 12) **Meladura:** Producto de alta concentración de sólidos (Brix) y de pureza en forma de jarabe que se obtiene del área de evaporación; es la materia prima de casa de cocimiento.

- 13) **Melaza:** Subproducto final obtenido del desecho del proceso de la caña de azúcar.
- 14) **Masas Cocidas:** Producto que se fabrica en los tachos, consiste en una mezcla de una fase líquida (miel) y una fase sólida (sacarosa en forma de cristales).
- 15) **Masa Cocida A (MCA):** Es el producto que se fabrica en tachos con semilla para masa cocida A y Meladura. Su pureza está en dependencia de la calidad de la caña.
- 16) **Masa Cocida B (MCB):** Es el producto que se fabrica en tachos con semilla para masa cocida B y Miel A. Su pureza oscila entre 74 y 76.
- 17) **Masa Cocida C (MCC):** Es el producto que se fabrica en tachos con semilla para masa cocida C y Miel B. Su pureza oscila entre 58 y 60.
- 18) **Magma C:** Mezcla de azúcar C, con agua o con jugo clarificado.
- 19) **Magma B:** Mezcla de azúcar B con agua o con jugo clarificado.
- 20) **Miel A:** Subproducto que se obtiene de las centrifugas al separar la miel contenida en la Masa Cocida A, su pureza oscila entre 67 y 70.
- 21) **Miel B:** Es un subproducto que se obtiene de las centrifugas al separar la miel contenida en la Masa Cocida B, su pureza oscila entre 57 y 59.
- 22) **Mieles:** Subproducto que queda después de la purga de una masa cocida.
- 23) **Miel C:** Es un subproducto final que se conoce en el argot técnico azucarero como miel final y comercialmente como melaza; se obtiene de las centrifugas al separar la miel contenida en la Masa Cocida C; un indicador de un buen trabajo realizado en Casa de Cocimiento es que su pureza debe oscilar entre 31 y 33
- 24) **Molienda:** es la cantidad de caña molida en la unidad de tiempo que esta unidad puede ser por hora y por día. Nota: no se vincula a casa de cocimiento, la materia prima de Casa de Cocimiento es la meladura.
- 25) **Miel Final:** Miel C también conocida como Melaza.
- 26) **Porcentaje de Pol (Grados Pol):** Es la proporción de sacarosa disuelta por cada cien partes de una solución.
- 27) **Purgar:** Acción de purga.
- 28) **Purga:** Separación de miel y azúcar de una masa cocida en las centrifugas por efecto de la fuerza centrípeta.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

- 29) **Pol:** es una suma algebraica de los Grados Pol de tres (3) azúcares presente: sacarosa; (está influenciada por los azúcares invertidos), dextrosa y levulosa y posiblemente por la rafinosa, cuando se efectúa la polarización se obtiene como resultado la suma de los poderes rotatorios de esos azúcares.
- 30) **Pureza:** Es la relación entre la sacarosa y los sólidos disueltos; que se interpreta como la proporción de sacarosa por cada cien partes de sólidos.
- 31) **Recobrado:** Es la recuperación de sacarosa en producto terminado (azúcar) por cada cien partes de sacarosa que entra en caña procesada. El recobrado es el sinónimo de eficiencia industrial.
- 32) **Sacarosa:** Disacárido compuesto por dos monosacáridos enlazados químicamente entre sí conocidos con el nombre común de glucosa y fructosa, el nombre científico de la sacarosa es Alfa – D, Glucopiranosil, Beta – D, Fructo Furanosida.
- 33) **Stock:** Especifica la cantidad de azúcar que están en proceso de los materiales que se encuentran en el proceso exclusivamente de Casa de cocimientos.
- 34) **Semilla para primera:** Magma B desarrollada volumétricamente con meladura en tacho, almacenada transitoriamente en semilleros de primera, destinadas para fabricar Masas Cocidas A. (MCA).
- 35) **Semilla pie directo para primera:** Es el volumen de la semilla para primera que cubre la calandria del tacho para hacer una Masa Cocida A (MCA).
- 36) **Semilla para segunda:** Magma C desarrollada volumétricamente y proporcional con meladura y miel B en tacho, almacenada transitoriamente en semilleros de segunda, destinadas para fabricar Masas Cocidas B (MCB)
- 37) **Semilla pie directo para segunda:** Es el volumen de la semilla para segunda que cubre la calandria del tacho para hacer una Masa Cocida B (MCB).
- 38) **Tachos:** Equipos de evaporación de simple efecto al vacío; trabajan similar a los evaporadores de jugo, únicamente que, de forma individual, se utilizan para fabricar masas cocidas y desarrollar semillas.

**Anexo III: Aplicación de las técnicas de la Ingeniería del Software para el desarrollo del modelo matemático y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento con asistencia de Excel.**

En principio el desarrollo del modelo matemático y la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento se dividió en dos subproblemas, que, en términos de las técnicas de la Ingeniería del Software y Metodología de la Programación Modular, corresponde a dos módulos:

Modulo I: Determinación de flujo másico de sólidos recuperables en meladura, azúcar y mieles finales.

Módulo II: Determinación de flujo másico de sacarosa en meladura, azúcar y mieles finales.

Por lo que prácticamente se resolvieron dos problemas aparentemente independientes uno del otro, pero realmente muy relacionados, que se conjugan en uno solo al emplear las técnicas de balances de materias global y por componentes.

**Desarrollo del Módulo I: Determinación de flujo másico de sólidos recuperables y sacarosa en meladura, azúcar y mieles finales.**

**Análisis del problema: Flujo másico de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final.**

**Definición del problema:**

Utilizando las técnicas del diseño descendente, el problema se descompone en dos sub-problemas, que son:

- a) La determinación del flujo másico de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- b) La determinación del flujo másico de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).

Para ambos casos, se hace necesario identificar y cuantificar el flujo másico tanto de sólidos solubles como de sacarosa contenidos en las distintas corrientes de materiales que interactúan en cada unidad de operación en casa de cocimiento del área de cristalización.

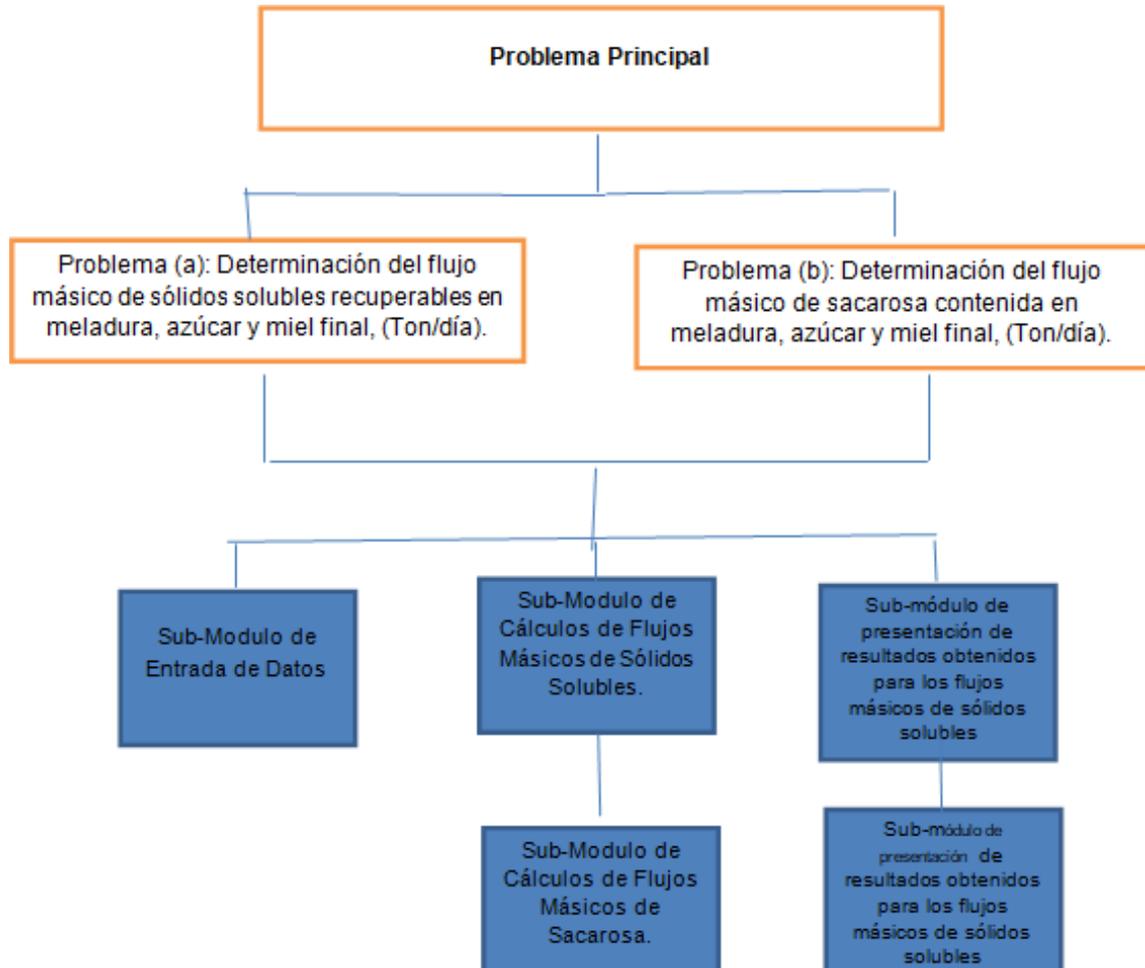
Continuando con la aplicación de la técnica del diseño descendente, para el análisis del problema, se han identificado los siguientes sub-problemas con su correspondiente estrategia de solución, descompuesta en sub-módulos, presentados en la Figura A.III.1.

- i) Sub-módulo de entrada de datos
- ii) Sub-módulo de cálculos de flujos másicos de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- iii) Sub-módulo de cálculos de flujos másicos de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

- iv) Sub-módulo de presentación de resultados obtenidos para los flujos másicos de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- v) Sub-módulo de presentación de resultados obtenidos para los flujos másicos de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).



**Figura A.III.1.- Aplicación de la técnica del diseño descendente de descomposición modular para la determinación del flujo másico de sólidos solubles recuperables y flujo másico de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).**

## Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.

### Especificaciones de entrada del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.

De acuerdo con el Diagrama de Flujo, presentado en la Figura 5.1, el proceso de cristalización, inicia con el ingreso de meladura a casa de cocimiento y de la cual se obtienen como productos de salida de este proceso: Azúcar y Miel final.

**Tabla A.III.1.- Especificaciones de entrada- Datos generales procedentes del área de molienda.**

Ítem	Componente	Identificador	Flujo Másico T / día	Pureza, %	Conc. °Bx	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Fuente de información.
1	Numero de masas cocidas	NMc	x				Área de molienda
2	Caña de azúcar procesada	CAz	x				Área de molienda
3	Jugo diluido	Jd				x	Área de molienda
4	Recirculación	R	x			x	Área de molienda
5	Masa de sólidos en jugo diluido	SJd	x		x	x	Área de molienda
6	Masa de Meladura	Md	x		x		Área de molienda

### Especificaciones de salida del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.

De las mediciones y determinaciones del Laboratorio de Control de proceso se obtienen los datos de entrada para la simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento, estableciéndose el Flujo másico (Ton/día) de Meladura y los grados de pureza de Meladura, Azúcar, Miel, Masas Cocida A,B y C, Masa al pie de cristalización (semillero) y Miel final, los cuales se presentan en la Tabla A.III.2.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

**Tabla A.III.2.- Especificaciones de entrada- Datos generales procedentes del área de molienda.**

Ítem	Componente	Identificador	Flujo Másico T / día	Pureza, %	Conc. °Bx	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Fuente de información.
7	Azúcar	Az		x			Laboratorio
8	Miel A que entra a Masa cocida B	Ma1		x			Laboratorio
9	Miel A para pie de cristalización	Ma2		x			Laboratorio
10	Miel B	MB		x			Laboratorio
11	Meladura que entra a Masa Cocida A	Md1		x			Laboratorio
12	Meladura para pie de cristalización	Md2		x			Laboratorio
13	Miel final	Mf		x	x	x	Laboratorio
14	Magma B	MgB		x			Laboratorio
15	Magma C	MgC		x			Laboratorio
16	Masa de Pie de Cristalización	MpC		x			Laboratorio
17	Masa cocida A	McA		x			Laboratorio
18	Masa cocida B	McB		x			Laboratorio
19	Masa Cocida C	McC		x			Laboratorio

Las especificaciones de salida con su formato correspondiente se presentan en la Tabla A.III.3 y A.III.4, en los que se formulan los Balances de masa de sólidos solubles recuperados y Balance de masa de sacarosa presentes en cada una de las etapas del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

**Tabla A.III.3.- Especificaciones de salida.- Balance de masas de sólidos solubles recuperados en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.**

<b>Entrada</b>		<b>Salida</b>						
<b>I</b>		<b>Masa Cocida A ( T/día)</b>						
1	Meladura que entra a Masa Cocida A	Md1	x	x	Azúcar	Az	x	x
2	Magma B	MgB	x	x	Miel A1	Ma1	x	x
3			x	x	Miel A2	Ma2	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>II</b>		<b>Masa Cocida B ( T/día)</b>						
1	Miel A que entra a Masa cocida B	Ma1	x	x	Miel B	MB	x	x
2	Magma C	MgC	x	x	Magma B	MgB	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>III</b>		<b>Masa Cocida C ( T/día)</b>						
1	Miel B	MB	x	x	Miel final	Mf	x	x
2	Mezcla de Cristalización	MpC	x	x	Magma C	MgC	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>IV</b>		<b>Mezcla de Cristalización ( T/día)</b>						
1	Meladura para pie de cristalización	Md2	x	x	Mezcla de Cristalización	MpC	x	x
2	Miel A para pie de cristalización	Ma2	x	x				
	Totales		x	x			x	x

Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.

Tabla A.III.4.- Especificaciones de salida.- Balance de masas de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final en el sistema de cocimiento de tres masas con doble magma, en cada etapa de operación y en cada equipo de cocimiento.

Entrada		Salida						
<b>I</b>	<b>Sacarosa contenida en Masa Cocida A ( T/día)</b>							
1	Meladura que entra a Masa Cocida A	Md1	x	x	Azúcar	Az	x	x
2	Magma B	MgB	x	x	Miel A1	Ma1	x	x
3			x	x	Miel A2	Ma2	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>II</b>	<b>Sacarosa contenida en Masa Cocida B ( T/día)</b>							
1	Miel A que entra a Masa cocida B	Ma1	x	x	Miel B	MB	x	x
2	Magma C	MgC	x	x	Magma B	MgB	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>III</b>	<b>Sacarosa contenida en Masa Cocida C ( T/día)</b>							
1	Miel B	MB	x	x	Miel final	Mf	x	x
2	Mezcla de Cristalización	MpC	x	x	Magma C	MgC	x	x
	Totales		x	x			x	x
<b>IV</b>	<b>Sacarosa contenida en Mezcla de Cristalización ( T/día)</b>							
1	Meladura para pie de cristalización	Md2	x	x	Mezcla de Cristalización	MpC	x	x
2	Miel A para pie de cristalización	Ma2	x	x				
	Totales		x	x			x	x

**Anexo IV: Procedimiento para resolver sistemas de ecuaciones lineales usando el complemento Solver de Excel de Microsoft 2013.**

**Definir y solucionar un problema**

**Paso 1:** En la pestaña Datos en el grupo Análisis, haga clic en Solver.



Si el comando Solver o el grupo Análisis no están disponibles, tendrá que cargar el programa de complemento Solver.

**Cómo cargar el programa de complemento Solver**

- Haga clic en la pestaña Archivo, elija Opciones y, a continuación, haga clic en la categoría Complementos.
- En el cuadro Administrar, haga clic en Complementos de Excel y, a continuación, en Ir.
- En el cuadro Complementos disponibles, active la casilla de verificación Complemento Solver y, a continuación, haga clic en Aceptar.

**Paso 2:** En el cuadro Establecer objetivo, escriba una referencia de celda o un nombre para la celda objetivo. La celda objetivo debe contener una fórmula.

**Paso 3:** Siga uno de los procedimientos siguientes:

- Si desea que el valor de la celda objetivo sea el valor máximo posible, haga clic en Máx.
- Si desea que el valor de la celda objetivo sea el valor mínimo posible, haga clic en Mín.
- Si desea que la celda objetivo tenga un valor determinado, haga clic en Valor de y luego escriba el valor en el cuadro.

**Paso 4:** En el cuadro Cambiando las celdas de variables, escriba un nombre o una referencia para cada rango de celda de variable de decisión. Separe con comas las referencias no adyacentes. Las celdas de variables deben estar directa o indirectamente relacionadas con la celda objetivo. Se puede especificar un máximo de 200 celdas de variables.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

**Paso 5:** En el cuadro Sujeto a las restricciones, realice lo siguiente para especificar todas las restricciones que desee aplicar.

- En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en Agregar.
- En el cuadro Referencia de la celda, escriba la referencia de celda o el nombre del rango de celdas para los que desea restringir el valor.
- Haga clic en la relación ( $\leq$ ,  $=$ ,  $\geq$ , int, bin o dif ) que desee establecer entre la celda a la cual se hace referencia y la restricción.
- Si hace clic en int, aparece integer en el cuadro Restricción. Si hace clic en bin, aparece binary en el cuadro Restricción. Si hace clic en dif, aparece alldifferent en el cuadro de diálogo Restricción.
- Si elige  $\leq$ ,  $=$ , o  $\geq$  para la relación en el cuadro Restricción, escriba un número, una referencia de celda o nombre o una fórmula.
- Siga uno de los procedimientos siguientes:
  - Para aceptar una restricción y agregar otra, haga clic en Agregar.
  - Para aceptar la restricción y volver al cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en Aceptar.

### **Sugerencias:**

- Puede aplicar las relaciones int, bin y dif solamente en restricciones en celdas de variables de decisión.
- Puede cambiar o eliminar cualquier restricción existente haciendo lo siguiente:
  - En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en la restricción que desee cambiar o eliminar.
  - Haga clic en Cambiar y realice los cambios que desee, o haga clic en Eliminar.

**Paso 6:** Haga clic en Resolver y siga uno de los procedimientos siguientes:

- Para mantener los valores de la solución en la hoja de cálculo, en el cuadro de diálogo Resultados de Solver, haga clic en Conservar solución de Solver.
- Para restaurar los valores originales tal como estaban antes de hacer clic en Resolver, haga clic en Restaurar valores originales.

### **Aclaraciones**

- Para interrumpir el proceso de resolución, puede presionar ESC. Microsoft Excel actualiza la hoja de cálculo con los últimos valores encontrados para las celdas de variable de decisión.
- Para crear un informe basado en su solución después de que Solver encuentre una solución, seleccione un tipo de informe en el cuadro Informes y haga clic en Aceptar. El informe se crea en una nueva hoja de cálculo del libro. Si Solver no encuentra una solución, la opción de crear un informe no está disponible.
- Para guardar los valores de la celda de variable de decisión como un escenario que pueda mostrar más tarde, haga clic en Guardar escenario en el cuadro de diálogo Resultados de Solver y luego escriba un nombre para el escenario en el cuadro Nombre del escenario.

### **Desplazarse por las soluciones de prueba en Solver**

1. Después de definir un problema, haga clic en Opciones en el cuadro de diálogo Parámetros de Solver.
2. En el cuadro de diálogo Opciones, active la casilla de verificación Mostrar resultado de iteraciones para ver los valores de cada solución de prueba y, a continuación, haga clic en Aceptar.
3. En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en Resolver.
4. En el cuadro de diálogo Mostrar solución de prueba, siga uno de los procedimientos siguientes:
  - Para detener el proceso de solución y ver el cuadro de diálogo Resultados de Solver, haga clic en Detener.
  - Para continuar el proceso de solución y ver la siguiente solución de prueba, haga clic en Continuar.

### **Cambiar la forma en que Solver encuentra soluciones**

1. En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en Opciones.
2. Elija o especifique valores para cualquiera de las opciones en las pestañas Todos los métodos, GRG Nonlinear y Evolutionary en el cuadro de diálogo.

### **Guardar o cargar un modelo de problema**

1. En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver, haga clic en Cargar/Guardar.
2. Especifique un rango de celdas para el área modelo y haga clic en Guardar o en Cargar.

Cuando guarde un modelo, especifique la referencia de la primera celda de un rango vertical o de las celdas vacías en que desee colocar el modelo de problema. Cuando cargue un modelo, especifique la referencia de todo el rango de celdas que contenga el modelo de problema.

**Sugerencia** Puede guardar las últimas selecciones con una hoja de cálculo en el cuadro de diálogo Parámetros de Solver guardando el libro. Cada hoja de cálculo en un libro puede tener sus propias selecciones de Solver y todas ellas se guardan. También puede definir más de un problema para una hoja de cálculo haciendo clic en Cargar/Guardar para guardar los problemas individualmente.

### **Métodos de resolución usados por Solver**

Puede elegir cualquiera de los tres algoritmos o métodos de resolución siguientes en el cuadro de diálogo Parámetros de Solver:

- **Gradiente reducido generalizado (GRG) no lineal** Se usa para problemas suavizados que son no lineales.
- **LP Simplex** Se usa para problemas lineales.
- **Evolutionary** Se usa para problemas no suavizados.

**Anexo V.- Procedimientos de cálculos de la capacidad volumétrica de tanques para almacenamiento de meladura, mieles, masas cocidas, crecimiento de semilla, cristalizadores y tachos.**

La empresa cuenta con 5 tanques destinados para almacenar meladura proveniente del área de la evaporación, estos tanques tienen dos formas geométricas una rectangular y otras semicilíndricas, ambas acopladas para formar un solo cuerpo. Para calcular las capacidades de los equipos de casa de cocimiento se realizaron medidas del radio y la altura a cada uno de los equipos y se registraron como se muestra en la Tabla A.V.5.1, con el apoyo de los trabajadores de la sección de casa de cocimiento y recibiendo especial colaboración del arquitecto de la gerencia industrial (Nicaragua, 2012). Seguidamente se determinaron la capacidad volumétrica que pueden almacenar cada uno de ellos, utilizando la ecuación correspondiente según sea el caso (ver Tabla A.V.5.1).

$$V_{SC} = \frac{\pi * r^2 * h_C}{2} \tag{A.V.5.1}$$

$$V_R = A_B * h_R \tag{A.V.5.2}$$

$$V_{TM} = V_{SC} + V_R \tag{A.V.5.3}$$

$$V_C = \pi * r^2 * h_C \tag{A.V.5.4}$$

Dónde: V es volumen (m<sup>3</sup>), r es el radio (m), h es altura (m) y A es el área (m<sup>2</sup>). Los subíndices SC, R, B, C y TM, son Semicilindro, rectángulo, Base, Cilindro y Tanque de meladura respectivamente.

**Tabla A.V.5.1** Registro de dimensiones y capacidades volumétricas de tanques de: meladura, mieles A y B.

Tanquería	Area	Altura	Radio	Vol.semci	Vol.rectang	Vol. Total
	m <sup>2</sup>	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Tanque de meladura	m <sup>2</sup>	m	m <sup>2</sup>	Ec.(6.1)	E.(6.2)	Ec.(6.1)+Ec.(6.2)
Tanque de miel	m <sup>2</sup>	m	m <sup>2</sup>	Ec.(6.1)	E.(6.2)	Ec.(6.1)+Ec.(6.2)

Fuente: elaboración propia.

**Determinación de capacidad volumétrica de Tanques de mieles (Miel A, Miel B)**

Al igual que para los tanques de meladura se obtuvieron las dimensiones de los siete tanques que dispone en el área; tres para miel A y cuatro para miel B, posteriormente se determinaron los volúmenes de almacenamiento de estos, haciendo uso de las ecuaciones A.V.5.1, A.V.5.2, A.V.5.3 y A.V.5.4, los cuales se registraron como se muestra en la Tabla A.V.5.1.

### **Determinación de capacidades volumétrica de los tachos**

Para producir masas cocidas y semilla, se cuenta con siete tachos designados para la cristalización de azúcar. Mediante observación y preguntas realizadas al personal del área de casa de cocimiento (Gomez & Genaro, 2012) se identificó el manejo y la operación de cada uno de los tachos, acorde con los tipos de masa a procesar. También se midieron las dimensiones (altura y diámetro) de cada uno de ellos (Saballos, 2012); La determinación de sus capacidades volumétricas se realizó por medio de las ecuaciones A.V.5.4 - A.V.5.7, dado que el equipo está conformado por tres partes, siendo estas; El cuerpo (forma cilíndrica), la calandria que es volumen ocupado por la masa a cocer en los tubos de circulación de la masa (ver figura A.V.5.1) y el fondo con forma de un cono truncado. En la Tabla A.V.5.2 se muestran las ecuaciones utilizadas para determinar las capacidades volumétricas de cada una de las partes del tacho, así como su respectivo volumen total.

$$V_{TF} = V_C * N_{TF} \quad (\text{A.V.5.5})$$

Donde N es el número de tubos, y el subíndice TF es tubo fluse.

$$V_{CAL} = V_{TC} + V_{TF} \quad (\text{A.V.5.6})$$

Donde los subíndices TC, y CAL significan tubo central, y calandria respectivamente.

$$V_{CT} = \frac{\Pi}{3} * h_{CT} (r_{CT\ SUP}^2 + r_{CT\ INF}^2 + r_{CT\ SUP} * r_{CT\ INF}) \quad (\text{A.V.5.7})$$

Donde los subíndices CT, SUP e INF significan, cono truncado, superior e inferior respectivamente.



**Figura A.V.5.1** Fotografía de la parte interior de la calandria de un tacho del Ingenio Benjamín Zeledón (a) tubo central y (b) tubos fluse.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

**Tabla A.V.5.2** Registro de dimensiones y capacidad volumétrica de los tachos

Partes del tacho	Dimensiones del equipo y ecuaciones para calcular el volumen							
	Diámetro (cm)			Altura	Numero de tubos fluses	Volumen		
	diametro	diam.inf	diam.sup	(cm)		(m <sup>3</sup> )	(pie <sup>3</sup> )	(gal)
Cuerpo superior (cilindro)						EC.(6.4)	EC.(6.4)	EC.(6.4)
Tubos fluses de calandria (cilindro)					#	EC.(6.5)	EC.(6.5)	EC.(6.5)
Tubos Central (cilindro)						EC.(6.4)	EC.(6.4)	EC.(6.4)
Anillo entre fondo y calandria (cilindro)						EC.(6.4)	EC.(6.4)	EC.(6.4)
Cuerpo Cónico (cono truncado) entre calandria y cuerpo del techo						EC.(6.7)	EC.(6.7)	EC.(6.7)
Fondo conico del tacho (cono truncado)						EC.(6.7)	EC.(6.7)	EC.(6.7)
Capacidad Volumétrica						TOTAL	TOTAL	TOTAL

Fuente: elaboración propia.

**Determinación de capacidades volumétrica recibidores de masa (porta templeas)**

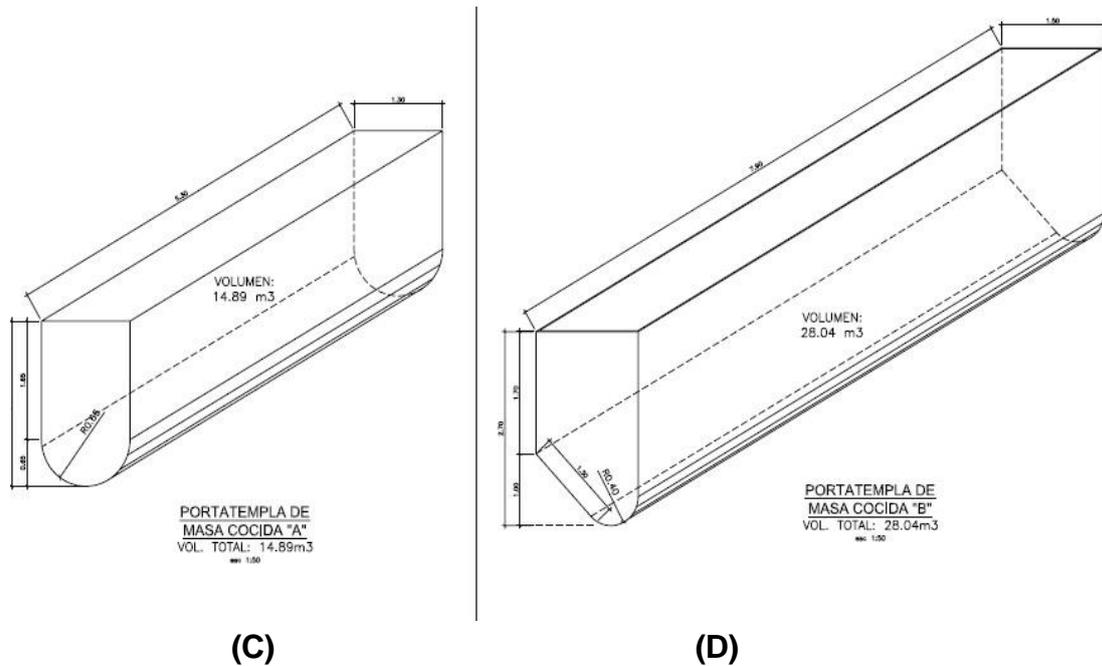
El Ingenio cuenta con cuatros porta templeas o recibidores de masas cocidas (masa proveniente del tacho), uno para masa cocida C, dos destinados a masas cocidas A y otro para masa cocida B.

El tanque recibidor de masas de tercera (ubicación: bajo tacho # 4), es donde se almacena una Masa de tercera aproximadamente de 45 min a 1 hora y 15 min, para que disminuya la temperatura de la masa y luego esta se envía hacia la batería de cristalizadores.

Estructuralmente los recibidores de Masa Cocida A y C tienen dos formas geométricas un semicilindro y un rectángulo ambas formas pertenecientes a la misma estructura (ver figura A.V.5.2), esta misma forma también la tienen los tanques de meladura, por lo cual para la determinación de su volumen, se usaron las ecuaciones A.V.5.1 - A.V.5.3

El recibidor de masa cocida B presenta una forma geométrica particular (ver figura A.V.5.2), diseñado así para la adecuada circulación de MCB hacia las centrifugas de segundas. Para la determinación de los respectivos volúmenes se utilizaron las ecuaciones A.V.5.8 - A.V.5.10.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**



**Figura A.V.5.2** Forma geométrica y dimensiones del porta templeas, (C) porta templea de masa cocida A y (D) porta templea de masa cocida B. **Fuente:** (Nicaragua, 2012)

$$V_{RS} = V_R - V_T \quad (\text{A.V.5.8})$$

$$V_R = A_R - L \quad (\text{A.V.5.9})$$

$$V = \frac{A_T * L}{2} \quad (\text{A.V.5.10})$$

Dónde: los subíndices RS, y T significan recibidor de segunda y triangulo respectivamente.

**Determinación de la capacidad volumétrica a Semilleros**

La semilla en forma de magma, semilla desarrollada de pie directo para masas cocidas y semilla de grano fino y mejorada para masas cocida C, se guarda transitoriamente en tanques semilleros; existen siete (dos en desuso salvo casos especiales, uno temporalmente se utiliza para magma B y uno como recibidor de masa de tercera), seis de ellos de forma cilíndrica ecuación A.V.5.4; el que se utiliza como Magmero B tiene dos formas geométricas, en la parte inferior un semicilindro y en la parte superior un rectángulo, para calcular el volumen de este se utiliza ecuaciones A.V.5.1- A.V.5.3.

**Semillero de primera:** Es un tanque cilíndrico que almacena transitoriamente semillas desarrollada del magma B, que se utiliza como pie directo para fabricar Masas cocidas A. presenta una forma geométrica totalmente cilíndrica.

**Semillero de segunda:** Es un tanque cilíndrico que recibe la semilla mejorada que se produce del magma C, la semilla permanece en este equipo hasta que un tacho de segunda carga un pie directo de esta, para fabricar una Masa

**Semillero de tercera:** Es un tanque cilíndrico donde se deposita eventualmente, la semilla de grano fino y/o grano mejorado, para ser utilizado en su momento como pie de desarrollo en caso de semilla grano fino, o como pie directo en caso de semilla mejorado para fabricar una Masa Cosida C.

**Tanque recibidor o pase de masas de tercera:** Es un recipiente cilíndrico de pase de masa de tercera. Dentro de estos tanques existen aspas o paletas, que están siempre en movimientos continuos para evitar que caramelize el material contenido en ellos, estas aspas o paletas ocupan un volumen dentro de los tanques el cual se le resta a cada uno de los tanques para encontrar su volumen real. Dado que el tanque cuenta con paletas cilíndricas y rectangulares, entonces fue necesario determinar el volumen de ambas; por tanto para las paletas cilíndricas se usó la ecuación A.V.5.11, mientras que la de la paleta rectangular se usó la ecuación A.V.5.12

$$V_{PC} = \pi * r^2 * h_C * NP \quad (A.V.5.11)$$

Dónde: r es el radio del cilindro de la paleta, NP es el número de paletas, h es la altura de la paleta y el subíndice pc es el volumen de paletas cilíndricas.

$$V_{PR} = A * h * NP \quad (A.V.5.12)$$

Donde A es el área del rectángulo de la paleta y el subíndice PR es paleta rectangular.

Estas paletas sean rectangulares o cilíndricas están unidas a un eje el cual también ocupa un volumen y debe calcularse para restarse también del volumen total del tanque que la contienen.

Este eje es de forma cilíndrica en algunos tanques y rectangulares en otros, así que se calcula su volumen según sea el caso con las ecuaciones A.V.5.2 y A.V.5.4.

### **Determinación de la capacidad volumétrica a Cristalizadores**

La masa cocida C se deposita primero en un recibidor de masa (porta temple), y luego se le da un tiempo de retención en la batería de cristalizadores para agotar a su máxima expresión la sacarosa en el sobrante de miel de dicha masa, existen ocho cristalizadores destinados a este objetivo, todos instalados horizontalmente; el primero de estos cristalizadores es totalmente cilíndrico; el resto presentan dos formas geométricas, en la parte inferior es un semicilindro, en la superior un rectángulo, Ver Figura A.V.5.2.

Los cristalizadores están provistos de un eje central hueco por dentro y de unas aspas también huecas unidas al eje en el cual circula agua que giran estas dentro del equipo, con el objetivo de enfriar la masa para que la sacarosa contenida en la miel sobresaturada de la masa cristalice por enfriamiento.

---

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

Exceptuando el ultimo cristalizador en el cual no se da este proceso de cristalización por enfriamiento, porque en este se calienta a la masa entre 50 y 55 grados centígrados para que fluya y pueda ser purgada en la centrifuga circulando agua caliente por sus aspas.

El cálculo de los agitadores se realiza porque equivale a uno por ciento o más del volumen total del cristalizador y esto provoca una disminución de la capacidad volumétrica por eso se le resta al volumen del cristalizador. Se realiza con las ecuaciones A.V.5.11 y A.V.5.12.

El cálculo de la capacidad volumétrica del primer cristalizador se realizó con la ecuación A.V.5.4. Para el resto de los cristalizadores se hizo la combinación de las ecuaciones del semicilindro y del rectángulo, por medio de las ecuaciones A.V.5.1 - A.V.5.3, en la Tabla A.V.5.3 se muestran las respectivas combinaciones.

**Tabla A.V.5.3 capacidades volumétricas de cristalizadores**

Cristalizadores	Volumen del cuerpo			
	Diametro	Radio	Largo	VOL
Cristalizador Nº 1 (cilindrico)	m	m	m	m <sup>3</sup>
				Ec. (6.4)
	Volumen del eje			Vol Real
	Radio(m)	Largo	vol	m <sup>3</sup>
	m	m	m <sup>3</sup>	Ec. (6.4) - Ec.(6.4)- Ec.(6.11)
	volumen de paletas			
	Radio	Largo	vol	
	M	m	Ec.(6.11)	

**Tabla A.V.5.4 capacidades volumétricas de cristalizadores con forma de semicilindro y rectángulo.**

Cristalizadores con formas de semicilindro y rectangulo	vol del rectangulo				vol del eje			
	Altura	Largo	Radio	vol	Radio	Largo	vol	
	m	m	IVI	m <sup>3</sup>	m	m	m <sup>3</sup>	
				Ec.(6.2)	Ec.(6.4)			
Cristalizador Nº 2, Nº 3, Nº4, Nº5, Nº6, Nº7, Nº 8	vol del semicilindro				Vol Real			
	Altura	Largo	radio	vol	m <sup>3</sup>			
	m	m	IVI	m <sup>3</sup>	[(Ec.(6.1) + Ec. (6.2) ) - ( E.c (6.11), (6.12) + Ec.( 6.4))]			
								Ec.(6.1)
	vol paletas							
	Nºpaletas	Radio	Largo	Vol				
#	m	m	m <sup>3</sup>					
				Ec.(6.11), (6.12)				

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

**Resultados de los cálculos de las capacidades volumétrica de tanques de meladura, tanque de miel a y tanques de miel b.**

Se determinaron las capacidades volumétricas de los equipos tanques de meladura, mieles, semilleros, tanques Magmeros, recibidores y tachos del área de cristalización. Obteniendo los siguientes resultados, que se presentan en la Tabla A.V.5.5.

Para los tanques de meladura y mieles se obtuvieron los siguientes resultados como muestra la Tabla A.V.5.5; la cual nos indica que hay una capacidad total de 135.22 m<sup>3</sup> para almacenar meladura.

Para almacenar miel A ay una capacidad total de 86.53 m<sup>3</sup> y para tanques de miel B hay una capacidad de almacenamiento de 114.72 m<sup>3</sup>

**Tabla A.V.5.5. Capacidades volumétricas de tanques de mieles y meladura**

<b>EQUIPOS</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Tanque de meladura # 1	29.46
Tanque de meladura # 2	26.48
Tanque de meladura # 3	24.45
Tanque de meladura # 4	27.96
Tanque de meladura # 5	26.87
<b>Total</b>	<b>135.22</b>
Tanque de miel A # 1	27.94
Tanque de miel A # 2	29.04
Tanque de miel A # 3	29.55
<b>Total</b>	<b>86.53</b>
Tanque de miel B # 1	28.50
Tanque de miel B # 2	28.74
Tanque de miel B # 3	28.74
Tanque de miel B # 4	28.74
<b>Total</b>	<b>114.72</b>

## Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.

La Tabla A.V.5.6, muestra las capacidades de almacenamiento de semilleros, magmeros y recibidores de masa.

**Tabla A.V.5.6. Capacidades volumétricas de semilleros, magmeros y receptores.**

<b>EQUIPOS</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Semillero de tercera	18.3861
Semillero de primera	18.3861
Semillero de segunda	18.3861
Magmero "C"	18.3861
Semillero (MCC)	10.8619
Magmero "B"	17.5743
Recibidor de MCC	33.2938
Recibidor de MCB	37.8910
Recibidor de MCA # 1	14.8859
Recibidor de MCA # 2	53.0416

La empresa cuenta con cristalizadores y estos tiene una capacidad de almacenamiento de 213.22 m<sup>3</sup>.

**Tabla A.V.5.7.: Capacidades volumétricas de cristalizadores**

<b>EQUIPOS</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Cristalizador # 1	23.30
Cristalizador # 2	20.17
Cristalizador # 3	21.06
Cristalizador # 4	19.58
Cristalizador # 5	20.02
Cristalizador # 6	12.15
Cristaliz. titanic # 1	43.56
Cristaliz. titanic # 2	53.35
<b>Total</b>	<b>213.22</b>

### Resultados de las capacidades volumétricas de los Tachos

En la Tabla A.V.5.8, se presentan los resultados de las capacidades volumétricas de los tachos individualmente. La empresa cuenta con 7 tachos del cual el más pequeño tiene una capacidad de 16.82 m<sup>3</sup> y el más grande tiene una capacidad volumétrica de 42.87 m<sup>3</sup>

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

**Tabla A.V.5.8.- Capacidades volumétricas de los tachos.**

<b>Equipo</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Tacho # 1	40.55
Tacho # 2	16.82
Tacho # 3	22.74
Tacho # 4	28.26
Tacho # 5	26.22
Tacho # 6	40.21
Tacho # 7	42.87

**Anexo VI.- Desarrollo del algoritmo para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

**A.VI.1.- Definición del problema**

Las técnicas del diseño descendente permiten descomponer los problemas complejos en problemas más sencillos, siendo este el caso en que el problema principal referido a la determinación de las cantidades de materiales existentes en el stock del área de cocimiento y cristalización, se descompone en dos sub-problemas, que son:

- La determinación de las cantidades de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, contenidos en los equipos de almacenamiento del área de cristalización
- La determinación de las cantidades de sacarosa contenidos en sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, en los equipos de almacenamiento del área de cristalización

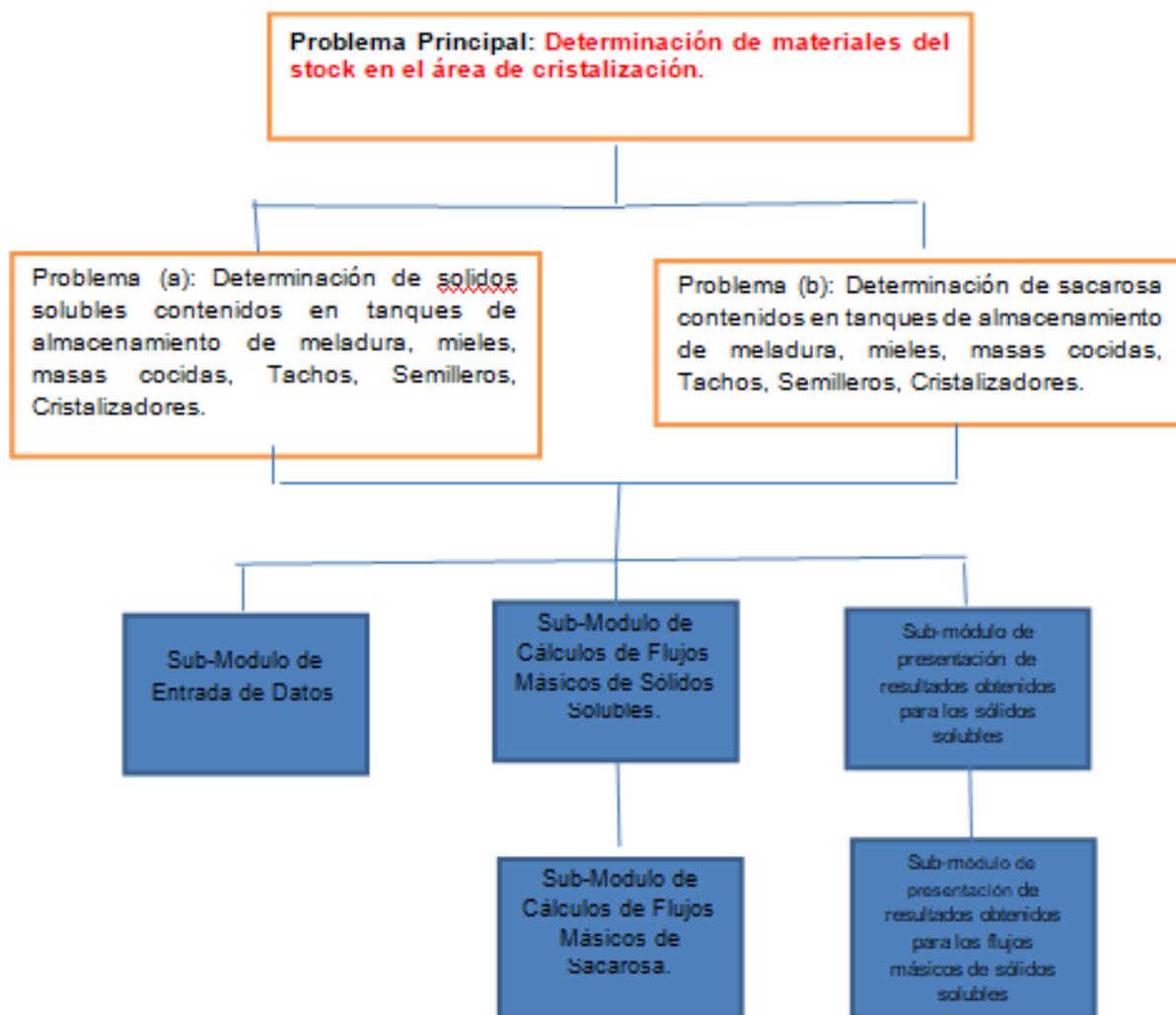
Para ambos casos, se hace necesario identificar y cuantificar las capacidades volumétricas de los equipos que almacenan y contienen los distintos materiales presentes en el stock, obtenidos en las distintas etapas del procesos de producción de azúcar en casa de cocimiento y área de cristalización.

Continuando con la aplicación de la técnica del diseño descendente, para el análisis del problema, se han identificado los siguientes sub-problemas con su correspondiente estrategia de solución, descompuesta en sub-módulos, presentados en la Figura A.VI.1.

- Sub-módulo de entrada de datos
- Sub-módulo de cálculos de sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- Sub-módulo de cálculos de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- Sub-módulo de presentación de resultados obtenidos para sólidos solubles recuperables en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).
- Sub-módulo de presentación de resultados obtenidos para los flujos másicos de sacarosa contenida en meladura, azúcar y miel final, (Ton/día).

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---



**Figura A.VI.1. Aplicación de técnicas de diseño descendente para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

**A.VI.2.- Datos de entrada para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

Para determinación las masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar, incluyendo mieles finales en el stock del área de cristalización, obtenidos durante el proceso en casa de cocimiento, fue necesario identificar todos aquellos equipos que reciben y almacenan estos materiales, y sus capacidades volumétrica de los equipos, aspectos que se abordan en el Anexo VI.

Los materiales que intervienen en el proceso de casa de cocimiento son: Meladura, Miel A, Miel B, Magma B, Magma C, Semilla de Primera, Semilla de Segunda, Semilla de Tercera, Masa Cocida A, Masa Cocida B, Masa cocida C, y miel C que es melaza

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

Los datos de entrada para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización, proceden de la determinación de volumen de todos y cada uno de los equipos en los que se almacenan y contienen los distintos componentes obtenidos en las etapas del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento y que luego pasan al stock de materiales del área de cristalización. Los resultados de la determinación de los volúmenes de estos equipos se realizó y se presentan en el Anexo VI. Así mismo los datos resultantes de las determinaciones y mediciones realizadas en el Laboratorio de Control técnico de la producción, relacionadas con la densidad de estos materiales, el porcentaje de pureza del contenido de sacarosa y grados Brix. El formato y las especificaciones de estos datos se presentan en la Tabla A.VI.1.

**Tabla A.VI.1.- Datos de entrada para determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

<b>Componente</b>	<b>Volumen, m<sup>3</sup></b>	<b><math>\rho</math>, Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Pol, %</b>	<b>Conc. °Bx</b>
Meladura	x	x	x	x
Miel A	x	x	x	x
Miel B	x	x	x	x
Magma B	x	x	x	x
Magma C	x	x	x	x
Semillero 1RA	x	x	x	x
Semillero 2DA	x	x	x	x
Semillero 3RA	x	x	x	x
Masa Cocida A	x	x	x	x
Masa Cocida B	x	x	x	x
Masa Cocida C	x	x	x	x

### **A.VI.3.- Determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

#### **Procedimiento para determinar la masa de materiales en stock**

Como ya se ha señalado, los volúmenes de material de stock se determinaron a partir de la medición de los niveles en cada tanque y utilizando las ecuaciones A.6.1 – A.6.10 respectivamente según la forma del equipo. Posteriormente, se suman los volúmenes de los equipos que tienen la misma categoría de material por ejemplo; si únicamente hay meladura en tres tanques, estos se suman, resultando así la cantidad total de meladura que hay en proceso, y así sucesivamente con el resto de materiales.

Una vez determinados los volúmenes de cada uno de los materiales en proceso se multiplica por su densidad para calcular el peso de cada material, como se muestra en la Ecuación A.6.1.

## **Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

---

$$P_M = V_M * D_M \quad (\text{Ec.A.6.1})$$

Dónde: P y D son peso (kg), densidad (kg/m<sup>3</sup>) respectivamente, y el sub índice M es material.

### **Determinación de la masa de sólidos en stock**

Para encontrar la masa de sólidos que existe en cada material, se mide el contenido de sólidos con el Brixómetro en °Brix, y se multiplica por el peso de cada material, los cuales se introducen en la Ecuación A.6.2, para su respectivo cálculo.

$$P_{SM} = P_M * BRIX_M \quad (\text{Ec.A.6.2})$$

Donde el sub índice SM es sólidos respectivos de cada material

### **Determinación de la masa de sacarosa en stock**

La masa de sacarosa se determina con el peso de los sólidos y la medición del Pol de cada material, y se calcula con la Ecuación A.6.3:

$$P_{SACM} = P_{SM} * Pol_M / 100 \quad (\text{Ec.A.6.3})$$

Donde: Pol es el porcentaje de sacarosa en el material, y el sub índice SACM indica sacarosa en el material.

### **d) Determinación sólidos en azúcar de materiales en stock**

Para determinar los sólidos contenidos en azúcar, primeramente se calcula la pureza promedio de todos los materiales del proceso de casa de cocimiento con las Ecuación A.6.4.

$$Pza_{PM} = P_{SAC} / P_S * 100 \quad (\text{Ec.A.6.4})$$

Donde Pza indica pureza, y los sub índices; PM, SAC y S denotan promedio, sacarosa, y sólidos respectivamente.

Para determinar los sólidos en azúcar después de determinar la pureza promedio con la Ecuación A.6.4, se utiliza la Ecuación A.6.5.

$$P_{SAZ} = \frac{(Pza_{PM} - Pza_{MF})}{(99.5 - Pza_{MF})} * P_{SCC} \quad (\text{Ec.A.6.5})$$

Donde Pza es pureza, los sub índices SAZ, PM, MF Y SCC indican sólidos en azúcar, promedio, miel final y sólidos en casa de cocimiento respectivamente.

**Modelación y simulación del proceso de producción de azúcar en casa de cocimiento de un ingenio azucarero.**

**Determinación de la masa de miel final y azúcar en miel final en stock**

Para obtener la masa de azúcar en la miel final, primero se calcula la masa de sólidos contenidos en la miel final con la Ecuación A.6.6, seguidamente se usa la Ecuación A.6.7, para determinar la cantidad de azúcar contenida en la miel final, y por último la masa de miel final se determina aplicando la Ecuación A.6.8.

$$P_{SMF} = P_{SCC} - P_{SAZ} \quad (\text{Ec.A.6.6})$$

$$QQ_{AZ} = ((P_{AZ} * 1.0006) * 1000 / 50) * 1.1023 \quad (\text{Ec.A.6.7})$$

Donde QQ es quintales, y el sub índice AZ es azúcar.

$$P_{MF} = P_{Smf} / Bx_{mf} * 10 \quad (\text{Ec.A.6.8})$$

El formato de presentación de resultados obtenidos se presenta en la Tabla A.VI.2.

**Tabla A.VI.2.- Datos de salida – Resultados de la determinación de masas de sólidos solubles recuperables, sacarosa y azúcar en el stock del área de cristalización.**

Componente	V, (m <sup>3</sup> )	ρ, (Kg/m <sup>3</sup> )	Conc. (°Bx)	Pol, (%)	Sólidos (Tn/día)	Sacarosa, (Tn/día)	Mieles Finales, (Tn)
Meladura							
Miel A							
Miel B							
Magma B							
Magma C							
Semillero 1 <sup>a</sup>							
Semillero 2 <sup>a</sup>							
Semillero 3 <sup>a</sup>							
Masa Cocida A							
Masa Cocida B							
Masa Cocida C							
Total							
Pza. promedio		%					
Pza. Miel Final		%					
Pza. Azúcar		%					
Peso_ Azúcar		qq					