

USO DE EXTRACCIONES DE VAPOR EN EVAPORADORES  
DE TRIPLE EFECTO PARA LA DISMINUCIÓN DEL  
CONSUMO DE AGUA

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Maestría en Tecnología e Ingeniería Azucarera

USO DE EXTRACCIONES DE VAPOR EN EVAPORADORES  
DE TRIPLE EFECTO PARA LA DISMINUCIÓN DEL  
CONSUMO DE AGUA

LUIS ALFONSO RODRÍGUEZ CANO




Trabajo de graduación presentado  
para optar al grado académico de

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA E INGENIERÍA AZUCARERA**


Guatemala

1999

Vo. Bo. :

(f)   
Ing. Jaime Gaviria  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Dr. Mario Melgar

(f)   
Dr. Enrique Acevedo

(f)   
Ing. Jaime Gaviria

Fecha de aprobación: 05 de noviembre de 1999

A Dios por darme la oportunidad de  
culminar otra etapa más de mi vida.

A mis padres por darme la vida y  
sus consejos.

A mi esposa e hijos por darme toda  
su comprensión en todo momento.

A mi asesor Ing. Jaime Gaviria por su ayuda  
Incondicional en todo momento.

Al Ingenio Madre Tierra por darme  
el apoyo y los recursos para la  
realización de este trabajo y en especial  
al Ingeniero César González por todo su apoyo.

## LISTA DE TABLAS Y GRAFICAS

Tabla	Página
2.1 Distribución de las caídas de presión	12
7.1 Datos iniciales del balance en el primer efecto sin extracciones	35
7.2 Balance de energía sin extracciones del primer efecto	35
7.3 Datos iniciales del balance en el segundo efecto sin extracciones	36
7.4 Balance de energía sin extracciones del segundo efecto	36
7.5 Datos iniciales del balance en el tercer efecto sin extracciones	37
7.6 Balance de energía sin extracciones del tercer efecto	37
7.7 Datos iniciales del balance en el tercer efecto con una extracción	41

## CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
A. Propiedades físicas	3
B. Propiedades termodinámicas	5
C. Conceptos básicos de la evaporación	10
III. JUSTIFICACIÓN	19
IV. OBJETIVOS	23
V. PROBLEMA A RESOLVER	25
VI. METODOLOGÍA	27
VII. RESULTADOS	31
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
IX. CONCLUSIONES	65
X. RECOMENDACIONES	67
XI. BIBLIOGRAFÍA	69

7.8	Balance de energía con una extracción en el tercer efecto	41
7.9	Datos iniciales del balance en el segundo efecto con una extracción	42
7.10	Balance de energía con una extracción en el segundo efecto	42
7.11	Datos iniciales del balance en el primer efecto con una extracción	43
7.12	Balance de energía con una extracción en el primer efecto	43
7.13	Datos iniciales del balance en el tercer efecto con dos extracciones	44
7.14	Balance de energía con dos extracciones en el tercer efecto	44
7.15	Datos iniciales del balance en el segundo efecto con dos extracciones	45
7.16	Balance de energía con dos extracciones en el segundo efecto	45
7.17	Datos iniciales del balance en el primer efecto con dos extracciones	46

7.18	Balance de energía con dos extracciones en el primer efecto	46
7.19	Datos iniciales del balance en el tercer efecto con tres extracciones	47
7.20	Balance de energía con tres extracciones en el tercer efecto	47
7.21	Datos iniciales del balance en el segundo efecto con tres extracciones	48
7.22	Balance de energía con tres extracciones en el segundo efecto	48
7.23	Datos iniciales del balance en el primer efecto con tres extracciones	49
7.24	Balance de energía con tres extracciones en el primer efecto	49
7.25	Datos iniciales para el cálculo de calentadores de jugo en el sistema sin extracciones	51
7.26	Balance de energía de los calentadores de jugo en el sistema sin extracciones	51
7.27	Tabla de resultados obtenidos de los balances	56
7.27	Agua necesaria para el condensador	57

## Figura

2.1	Evaporador de simple efecto	17
2.2	Tipos de separadores de arrastre de jugo	18
2.3	Tipos de condensadores	18
2.4	Esquema de evaporación de triple efecto	18
7.1	Balance de materiales sistema sin extracciones	38
7.2	Balance de materiales sistema con una extracción	38
7.3	Balance de materiales sistema con dos extracciones	50
7.4	Balance de materiales sistema con tres extracciones	50
7.5	Gráfica de agua de inyección a condensadores	58

## RESUMEN

El presente trabajo pretende evaluar la incorporación de extracciones de vapor entre los diferentes efectos en un esquema de evaporación de triple efecto al vacío en la fábrica de un Ingenio Azucarero.

Se realizaron los balances de materiales y energía para los distintos casos evaluados como lo fueron:

- Sistema sin extracciones
- Sistema con una extracción
- Sistema con dos extracciones
- Sistema con tres extracciones

A todos los sistemas se les alimentó con un jugo claro de la misma característica ( $16^{\circ}\text{Bx}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ) y se obtuvo una misma calidad de meladura ( $54.8^{\circ}\text{Bx}$ ). La única pérdida de energía incorporada al balance fue la relacionada a las pérdidas por radiación la cual tuvo

una magnitud del 1.25% del total de la energía que ingresó a cada vaso del sistema evaporación.

Se observa una reducción entre el 11 a 30% del consumo global de vapor de escape, respecto del sistema sin extracciones y un 24 a 46% del consumo de agua de enfriamiento en el condensador de los gases del último efecto.

Se observa que las extracciones de vapor benefician al Ingenio Azucarero tanto en la mejora de la utilización de la energía disponible, así como en la reducción de la cantidad de agua del proceso descargada a los efluentes.

## I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación consiste en un análisis del manejo del vapor en una estación de evaporación de triple efecto. Se realizará el balance de materiales y el energético.

Al tener los balances iniciales, se procederá a la esquematización de tres propuestas de modificación del uso del vapor en los distintos efectos del sistema de evaporación al vacío.

Se analizará la modificación del sistema por medio de la extracción de vapor entre el primero y segundo efecto, dos extracciones, una entre el primero y segundo efecto, junto con otra entre el segundo y tercer efecto. Por último se realizará el análisis de tres extracciones de vapor, una en cada efecto.

Con dichas extracciones se pretende mejorar la utilización del vapor, así como disminuir la cantidad de agua

utilizado para el enfriamiento en los condensadores para la formación de vacío. De esta manera, se tendrá un ahorro energético que disminuye el consumo de energía eléctrica y por otra parte se disminuirá la cantidad de agua contaminada térmicamente descargada a los efluentes del Ingenio.

## II. ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo los ingenios azucareros han mejorado sus eficiencias tanto operacionales como energéticas. En la actualidad los ingenios azucareros guatemaltecos son energéticamente auto suficientes.

La tendencia en la actualidad es la de la utilización del combustible disponible para generar vapor para la cogeneración de energía eléctrica. Esto conlleva un ahorro de consumo de vapor dentro de las fábricas.

### A. PROPIEDADES FÍSICAS

#### 1. Estado de la materia

El estado de un cuerpo es la generalidad de las magnitudes físicas medibles de la sustancia que lo constituye y que son independientes de la forma externa del cuerpo.

Magnitudes de estado térmicas son presión, volumen y temperatura; magnitudes de estado calóricas con entalpía específica, energía interna específica y entropía específica. Estas se determinan a partir de mediciones calorimétricas o se derivan de la ecuación de estado térmica (XI.1).

## 2. Concentración

Para el caso de sistemas binarios o multicomponentes, la concentración está dada por la relación entre:

- Uno o algunos componentes o la suma de todos los componentes (concentración másica, contenido de materia seca, fracción molar).
- Un componente de la mezcla sobre el segundo componente (contenido másica, contenido molar)
- La masa o fracción molar de un componente sobre la unidad volumétrica de la mezcla (concentración volumétrica, molaridad).

### 3. Concentración de saturación

La concentración de saturación es aquella concentración de una solución para la cual la solución se encuentra en equilibrio estable con el material precipitado. Un aumento de la concentración, por encima de la saturación, provoca que el material disuelto se precipite de la solución, además esta propiedad depende de la temperatura (XI.1).

## B. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

### 1. Presión de Vapor

Cuando se evapora un líquido en un recipiente cerrado, las moléculas no pueden escapar de la vecindad del líquido. En el transcurso de su movimiento desordenado, algunas moléculas regresan al líquido. La velocidad de retorno de las moléculas de vapor al líquido, depende de la concentración de moléculas en el vapor. Cuanto mayor sea el número de moléculas en un determinado volumen de vapor, mayor será la probabilidad de que alguna de ellas choque con el líquido y sea recapturada (XI.6).

La velocidad de regreso de las moléculas de vapor al líquido es lenta debido a que hay pocas moléculas en el vapor. El proceso de la evaporación continúa aumentando la concentración de las moléculas en el vapor, por lo que la velocidad de condensación también aumenta. Este proceso se realiza hasta que el sistema alcanza un punto en el que la velocidad de evaporación es igual a la velocidad de condensación, llamado punto de equilibrio (XI.6).

Puesto que la concentración de las moléculas de vapor es constante en el equilibrio, la presión que ejercen las moléculas del vapor es también constante. Esta presión es llamada presión de vapor del líquido y es una característica de cada compuesto a una temperatura determinada.

## 2. Energía

Durante los años 1840-1878 J. P. Joule llevó a cabo cuidadosos experimentos sobre la naturaleza del calor y el trabajo, los que ayudaron grandemente a conceptualizar el fundamento de la energía. El principio general de

conservación de la energía fue establecido alrededor de 1850. Por experiencia se sabe que un objeto caliente pierde calor al ponerse en contacto con otro frío, en tanto éste se calienta por lo que a esa energía que se transfiere de un lugar a otro se le denomina calor. Actualmente, se considera al calor como algo relacionado con el movimiento de los átomos o moléculas de la materia.

### 3. Energía Interna

Junto con los experimentos de Joule, se practicaron otros en donde se comprobó que al agregarle energía en forma de trabajo al agua, ésta energía se podía extraer en forma de calor. A todo esto, a la diferencia de energía del agua después de agregarle trabajo, y antes de entregar esa energía como calor, se le denomina Energía Interna (XI.8).

#### 4. Entalpía

Además de la Energía Interna existen otras funciones termodinámicas de uso común como la Entalpía. La Entalpía se define como:

$$H = U + (P \cdot V) \quad (a)$$

Donde: U= Energía Interna

P= presión absoluta

V= volumen

Por consiguiente la Entalpía reúne las condiciones de Energía Interna y las condiciones a la que está expuesta la materia. Como el volumen y la energía interna son extensivas (depende de la cantidad de materia), la Entalpía también es una propiedad extensiva (XI.8).

En procesos de flujo de materiales la propiedad más importante es la entalpía en lugar de la energía interna, por la que se puede deducir que, asumiendo que no existe trabajo dentro del sistema:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q \quad (b)$$

donde Q = calor

H1= entalpía en el estado 1

$H_2$  = entalpía en el estado 2

$\Delta H$  = cambio de entalpía

Como  $H$  es una función de estado y una propiedad de la materia, sus valores, dependen sólo de las condiciones puntuales.

### 5. Capacidad Calorífica

En el estudio de la transferencia de calor se ha observado que ciertos materiales poseen una mayor o menor capacidad de transferir el calor de un lado a otros, a esta propiedad se conceptualizó como la capacidad calorífica y se define como:

$$C = dQ / dT \quad (c)$$

Donde  $C$  = capacidad calorífica

$dQ$  = cambio de energía (calor)

$dT$  = cambio de temperatura

Después de despejar  $dQ$  e integrar la ecuación surge otra manera de calcular el calor de un sistema y se obtiene:

$$Q = C * \Delta T \quad (d)$$

Donde  $\Delta T$  = cambio de temperatura

## 6. Calor latente de vaporización

Es el calor necesario para llevar una sustancia del estado líquido al gaseoso sin cambio de temperatura. Al proceso inverso se le denomina calor latente de condensación, como propiedad característica de la materia (XI.8).

## C. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA EVAPORACIÓN

En la producción de azúcar de caña se requiere evaporar el agua presente en la solución de azúcar a fin de obtener un producto final cristalino. La evaporación se lleva a cabo en dos etapas: la primera se lleva a cabo en una estación de evaporación a fin de concentrar la solución, y la segunda en un tacho al vacío para cristalizar el azúcar de la solución. La primera etapa se lleva a cabo generalmente en evaporadores de múltiple efecto para obtener una mejor economía térmica (XI.2).

La estación de evaporación en la fabricación de azúcar elimina típicamente 90% del agua del jugo clarificado desde

un Brix de 16 en jugo diluido hasta un Brix de 63 en la meladura.

### 1. Sistema de simple y múltiple efecto

Un evaporador de simple efecto está representado por un recipiente o vaso cerrado a presión dividido en dos secciones por un divisor que no permite la pérdida de presión. Una sección está conectada a una fuente de vapor de agua y la otra está parcialmente llena de jugo. Cuando el vapor de agua se encuentra a una temperatura mayor al punto de ebullición del jugo ocurrirá lo siguiente: (a) el vapor de agua se condensará y transferirá calor al jugo; (b) el jugo hervirá y desprenderá vapor de agua.

Un evaporador de múltiple efecto más sencillo es el constituido por dos evaporadores de simple efecto conectados en serie, la salida del vapor del primer efecto sería la fuente de energía del siguiente efecto. Estos arreglos pueden extenderse generalmente a 3, 4 ó 5 efectos, el requerimiento básico para asegurar la operación es que la temperatura de ebullición del líquido de cada efecto sucesivo sea más baja

que la temperatura de vapor que entra al vaso. Esta diferencia de temperatura suministra la fuerza impulsora para efectuar la transferencia de calor del vapor al líquido (XI.2).

Siempre que se condense vapor de agua se deben tomar medidas para la extracción continua de los gases incondensables (XI.2).

Las caídas de presión a través de los sistema de evaporación en serie están relacionadas con la siguiente tabla:

Tabla 2.1

Distribución de las caídas de presión

Sistema de evaporación	Distribución de presiones
Triple efecto	$11/30+10/30+9/30$
Cuádruple efecto	$11/40+10.3/40+9.7/40+9/40$
Quíntuple efecto	$11/50+10.5/50+10/50+9.5/50+9/50$

## 2. Principio de Rillieux

El fenómeno de la evaporación de múltiple efecto fue descubierto por Rillieux en Louisiana y se patentó en 1840. A partir de dichas investigaciones se desarrollaron los siguientes principios:

- En un evaporador de múltiple efecto, una libra de vapor de agua evaporará tantas libras de agua como efectos haya.
- Si se extraen vapores de un efecto cualquiera del evaporador de múltiple efecto y se utiliza fuera del sistema del evaporador en lugar de vapor de agua, el ahorro de vapor de agua será:

(# del efecto de la extracción \* lb vapor de agua extraído) (e)

# total de efectos en la serie

## 3. Evaporadores Tipo Roberts

En la fabricación de azúcar existen varios tipos de evaporadores de múltiple efecto. Uno de estos tipos y el más comúnmente utilizado es el tipo Roberts, que consta de una calandria, un cuerpo y un separador de arrastre en la parte superior del mismo (figura 2.1). Como en estos equipos la

evaporación es violenta, se requiere un especial cuidado en el control de arrastre de partículas de jugo en los vapores generados por el vapor proveniente de la ebullición del jugo. Algunas de las inconveniencias por tener arrastres de jugo son:

- Si los vapores van a utilizarse después de la condensación como agua para alimentación de calderas, el azúcar presente dañará las calderas.
- Si los vapores proceden del último efecto y se condensan en un condensador barométrico, el líquido arrastrado representará una pérdida monetaria y una descarga de contaminación a las aguas receptoras.

La descarga de contaminantes de los condensadores de paso único se ha convertido en años recientes en un factor crítico de la operación de los evaporadores al vacío como parte de los esfuerzos para controlar la contaminación ambiental (XI.2).

#### 4. Separadores de Arrastre

Como se dijo anteriormente, se ha tenido muy en cuenta el control de los arrastres de jugo en el vapor proveniente de la evaporación del agua del jugo. Es por ello que se han desarrollado los llamados separadores de arrastre y existen de distintos tipos pero su función es común, la de atrapar las partículas de jugo y retornarla a la parte inferior del evaporador. Esto se logra ya sea por contacto o por un cambio brusco de la dirección del vapor que contenga el arrastre como el separador centrífugo (figura 2.2), uno de los más usados (XI.2).

#### 5. Condensadores Barométricos

El vapor de agua introducido al primer efecto de la serie se condensa dentro del primer cuerpo. De modo similar, el vapor de agua en cada efecto se condensa en cada cuerpo siguiente, por lo que el vapor producido por el último vaso de la serie debe condensarse. Para ello se utiliza el llamado condensador (figura 2.3), dicho vapor es condensado por

contacto directo con agua en el condensador generalmente a contracorriente.

El condensador es un recipiente cerrado en el que el vapor del jugo entrante se mezcla con una corriente de agua más fría. Cada condensador cuenta asimismo con medidas para la remoción de los gases no condensables que entran al vapor proveniente del jugo, generalmente se desalojan por medio de una bomba de vacío de anillo líquido (XI.2).

## 6. Transferencia de calor en un sistema de evaporación

La evaporación en simple o múltiple efecto depende de la transferencia de calor a partir de un vapor condensante caliente a través de las paredes de los tubos de la calandria hasta un líquido (jugo) en ebullición a una temperatura más baja. La relación de transferencia de calor se describe en la siguiente ecuación:

$$Q = U A \Delta T \quad (f)$$

Donde:  $Q$  = calor

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor

$A$  = área de transferencia de calor

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre vapor y líquido

### 7. Diagrama de entalpía

Son diagramas en los cuales se representan las distintas propiedades ya sea de sustancias puras o de mezclas binarias.

Estos diagramas son de gran utilidad en el cálculo de calores específicos, entalpías, temperaturas y concentraciones (XI.1).

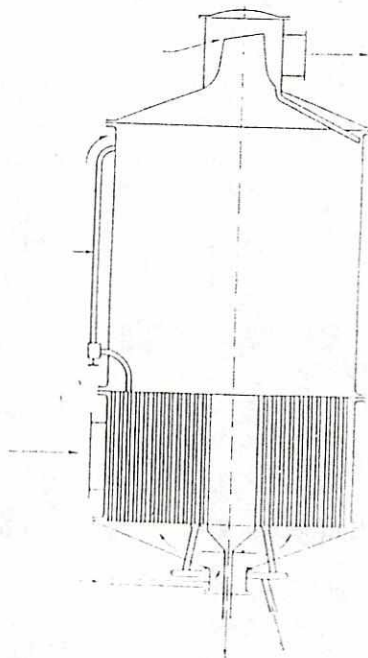


Figura 2.1 Evaporador de simple efecto

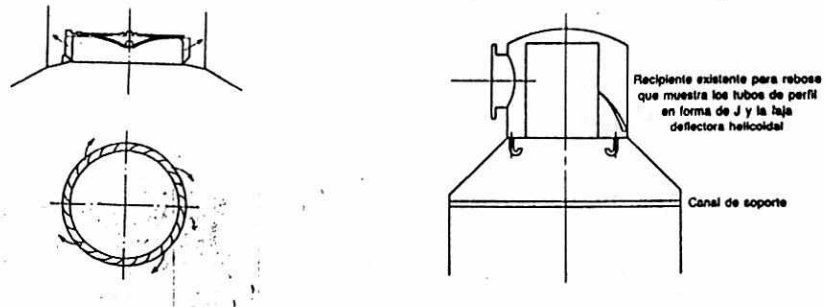


Figura 2.2 Tipos de separadores de arrastre de jugo

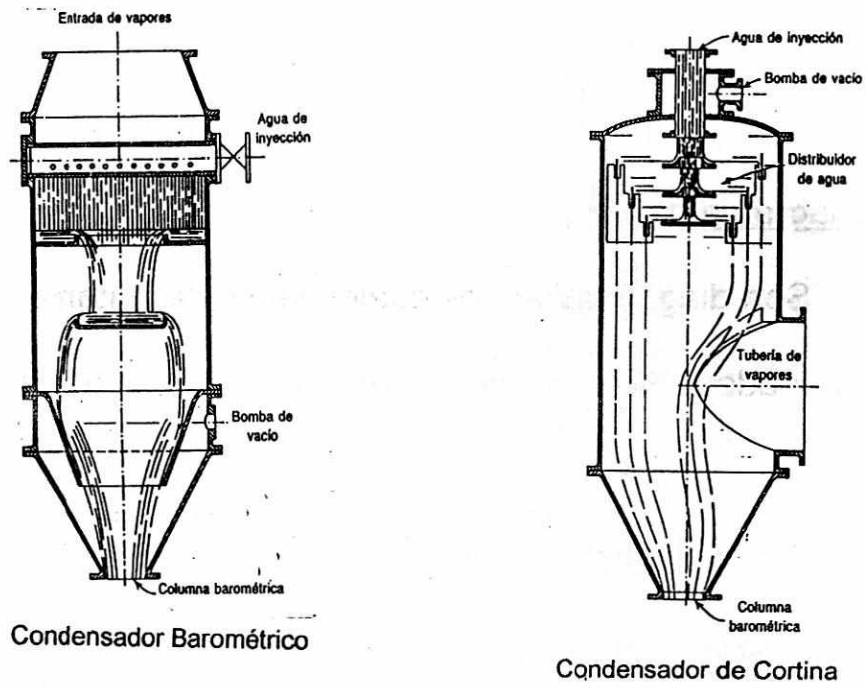


Figura 2.3 Tipos de condensadores

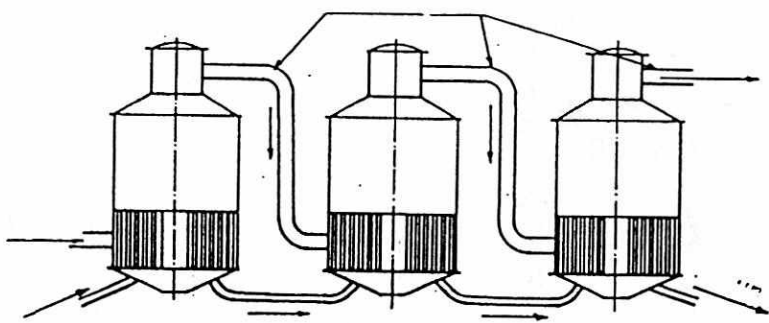


Figura 2.4 Esquema de evaporación de triple efecto

### III. JUSTIFICACIÓN

Al paso de los años la industria azucarera se ha caracterizado por ir a la vanguardia en lo que respecta a la eficiencia de sus plantas. Cada vez se han encontrado mejoras en el proceso y equipo que han conllevado a un ahorro significativo en los costos de operación, siendo así la industria azucarera una industria con la idea de una interminable mejora continua.

Gran parte de la energía suministrada al proceso de recuperación de azúcar de la caña, es por medio del vapor de agua proveniente de las calderas. El ingeniero de proceso es el responsable del uso adecuado de dicha energía tanto térmica como económicamente, manejando las distintas variables que en el proceso se involucran, sin dejar de tomar en cuenta el cuidado del equipo en servicio.

Por otra parte, en la actualidad hay una tendencia a crear un involucramiento a las industrias sobre la responsabilidad del cuidado del medio ambiente. Por esto ya existen leyes en muchos países industrializados acerca del control de desechos y contaminación que incluyen:

- Regulación de sustancias tóxicas
- Demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en aguas residuales
- Sólidos suspendidos en las aguas residuales
- Emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO en emisiones de gases
- Ruido
- Contaminación térmica del agua

Respecto del último caso anteriormente descrito, se regula muy poco en la actualidad en nuestro medio, pero a la larga será una de las mayores restricciones en términos de regulación ambiental.

Es por ello que este trabajo pretende desarrollar un tema en el cual se estudiará una mejora en el proceso del ingenio azucarero al mismo tiempo de minimizar la cantidad de agua de enfriamiento descargada a las aguas residuales. Situaciones en las cuales la industria azucarera y el medio ambiente saldrán favorecidos por medio de un arreglo del uso de la energía proveniente de un análisis termodinámico del uso del vapor de agua dentro de la planta.



## IV.OBJETIVOS

### A. General

- Mejorar la eficiencia del uso del vapor de agua en una estación de evaporación de triple efecto en un Ingenio Azucarero por medio de un análisis termodinámico en el cual se involucran extracciones de vapor de agua entre las etapas de dicho esquema de evaporación, al mismo tiempo de minimizar el uso de agua de enfriamiento en los condensadores de vapor.

### B. Específicos

- Elaboración de varios esquemas de los posibles arreglos del uso del vapor de agua en la estación de evaporación de triple efecto.
- Cálculo del balance térmico de los distintos esquemas propuestos del sistema de evaporación al vacío de triple efecto.

- Cálculo de los consumos de agua de enfriamiento en los condensadores para los distintos esquemas propuestos del sistema de evaporación al vacío de triple efecto.
- Cálculo del ahorro de vapor para los distintos esquemas propuestos para el sistema de evaporación al vacío de triple efecto.
- Elaboración de la curva de consumo de agua en los condensadores de una serie de evaporación de triple efecto.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

Es evidente que toda empresa que desea sobrevivir en el mercado debe competir en precio y eso se logra por medio de la eficiencia en la elaboración del producto.

En este trabajo se optimizará el uso de vapor dentro de la fábrica en un Ingenio Azucarero al mismo tiempo de disminuir la cantidad de agua de enfriamiento que luego se descarta a las aguas residuales. Con ello se logrará buscar un mejor posicionamiento de nuestro producto para minimizar los contaminantes descartados a los drenajes.



## VI. METODOLOGÍA

A. Desarrollo del sistema de evaporación de triple efecto sin extracciones de vapor.

1. Elaborar diagrama de flujo de materiales
2. Elaborar balance de materiales
3. Elaborar balance energético

B. Desarrollo del sistema de evaporación al vacío de triple efecto con una extracción de vapor en el primer efecto de la serie.

1. Elaborar diagrama de flujo de materiales
2. Elaborar balance de materiales
3. Elaborar balance energético

C. Desarrollo del sistema de evaporación al vacío de triple efecto con dos extracciones de vapor, una en el primer efecto y otra en el segundo efecto de la serie.

1. Elaborar diagrama de flujo de materiales
2. Elaborar balance de materiales
3. Elaborar balance energético

D. Desarrollo del sistema de evaporación al vacío de triple efecto con tres extracciones, una en el primer efecto, otra en el segundo efecto y la última en el triple efecto de la serie.

1. Elaborar diagrama de flujo de materiales
2. Elaborar balance de materiales
3. Elaborar balance energético

E. Comparación entre los distintos sistemas de evaporación de triple efecto con extracciones propuestas y el sistema original de evaporación de triple efecto sin extracciones.

1. Comparación de consumos de vapor
2. Comparación de consumos de agua de enfriamiento en el condensador.

3. Comparación de las diversas características de los materiales a través de la serie de triple efecto con las distintas modificaciones.

F. Construcción de la curva de consumo de agua de enfriamiento para una serie de evaporación para las distintas condiciones de trabajo.



## VII. RESULTADOS

El procedimiento de cálculo del balance de energía y materiales en el sistema de evaporación de triple efecto sin extracciones, se muestra a continuación:

Base:

4 kg/h jugo claro a 100°C y 16.0°Bx

1 kg/h vapor de escape a 13.3 psig y 120°C

Las caídas de presión se calculan a partir de la tabla 1, como se presenta a continuación:

Presión del vapor de escape: 28.0 psia

Presión del último vaso: 2.4 psia

Caída total de presión:  $28.0 - 2.4 = 25.6$  psi

Presión del primer vaso:  $28 - (25.6 * (11/30)) = 18.6$  psia (3.9 psig)

Presión del segundo vaso:  $18.6 - (25.6 * (10/30)) = 10.1$  psia (9" Hg vac)

Presión del tercer vaso:  $10.1 - (25.6 * (9/30)) = 2.4$  psia (25" Hg vac)

Con las anteriores presiones absolutas se encuentra en las tablas de vapor saturado la temperatura a la que corresponde dicha presión y se obtiene:

Temperatura del primer vaso: 103.0°C

Temperatura del segundo vaso: 89.4°C

Temperatura del tercer vaso: 56.1°C

Las energías de los componentes involucrados se calcularon con un nivel de referencia 0°C, para las correspondientes energías de cada material se calcularon como sigue:

Vapor →  $E_v = m \cdot H$

Jugo →  $E_j = m \cdot c \cdot T$

Agua condensada →  $E_c = m \cdot a$

Capacidad calórica del jugo →  $c = 1 - 0.006 \cdot B$  (kcal/kg)

Donde,  $m$  = flujo másico

$H$  = entalpía

$c$  = capacidad calórica

$T$  = temperatura

$a$  = calor latente de vaporización

$B$  = Brix

Se asumirá un 1.25% de pérdidas de calor por radiación en la energía total que ingresa a cada vaso.

Para el primer vaso se tiene el siguiente procedimiento para el respectivo balance de masa y energía:

*Energía del jugo que ingresa:*

$$m = 4.000 \text{ kg/h}$$

$$B = 16.0^\circ \text{Bx}$$

$$T = 100.0^\circ \text{C}$$

$$c = 1 - 0.006 * 16 = 0.904 \text{ kcal/kg}$$

$$E_j = 4.000 * 0.904 * 100.0 = 361.60 \text{ kcal/h}$$

*Energía del vapor que entra:*

$$m = 1.000 \text{ kg/h}$$

$$H = 646.0 \text{ kcal/kg}$$

$$T = 120.0^\circ \text{C}$$

$$E_v = 1 * 646 = 646.00 \text{ kcal/h}$$

$$\text{Energía total entrando: } 361.60 + 646.00 = 1007.60 \text{ kcal/h}$$

*Pérdidas por radiación:*

$$989.52 * 0.0125 = 12.60 \text{ kcal/h}$$

*Energía del agua condensada:*

$$m = 1.000 \text{ kg/h}$$

$$a = 120.1 \text{ kcal/kg}$$

$$T = 120.0^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1.000 * 120.3 = 120.3 \text{ kcal/h}$$

*Energía del vapor generado:*

$$m = x \text{ kg/h}$$

$$H = 640.0 \text{ kcal/kg}$$

$$T = 103.0^\circ\text{C}$$

$$E_v = x * 640.0 = 640.0x1 \text{ kcal/h}$$

*Energía del jugo que sale:*

$$m = (4.000 - x1) \text{ kg/h}$$

$$T = 103.0^\circ\text{C}$$

$$E_v = (4.000 - x1) * 0.904 * 103.0 \text{ kcal/h}$$

De la misma manera se calculan el segundo vaso de la serie y el tercero, los resultados se muestran a continuación:

**Balance energético y de materiales del primer efecto**

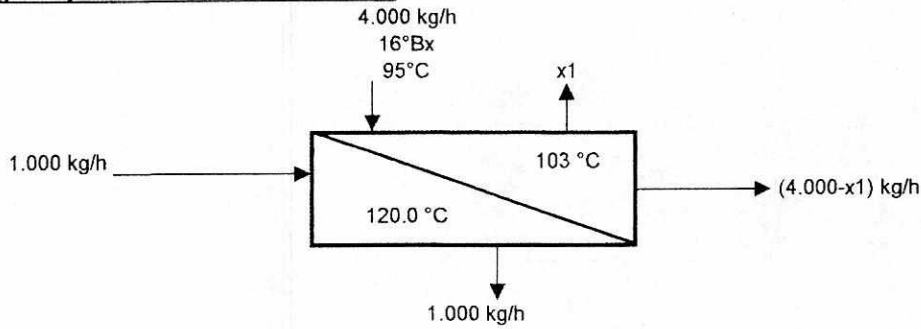


Tabla 7.1  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	1.000	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Entalpía	646	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	4.000	kg/h
	Temperatura	100	°C
	Brix	16	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	1.000	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Calor latente	120.3	kcal/kg
Vapor generado	masa	x1	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	(4.000-x1)	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C

Tabla 7.2  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	646.00	
Jugo entrando	361.6	
<b>Energía entrando</b>	<b>1007.6</b>	
Pérdida por Radiación		12.60
Agua condensada		120.30
Vapor generado		640*x1
Jugo saliendo		(4.000-x1)*0.904*103
<b>Energía saliendo</b>		<b>505.35+546.89x1</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$505.35 + 546.89x1 = 1007.6$$

$$x1 = 0.918 \text{ kg/h de vapor generado}$$

**Jugo saliendo**

$$4.000 - 0.918 = 3.082 \text{ kg/h de jugo saliendo}$$

**Brix del jugo saliendo**

sólidos que entran son iguales a los sólidos que salen

$$\text{Sólidos entrando} = 0.64 \text{ kg/h}$$

$$\text{Sólidos saliendo} = 0.64 \text{ kg/h}$$

$$\text{Brix saliendo} = 20.8 \text{ °Bx}$$

**Balance energético y de materiales del segundo efecto**

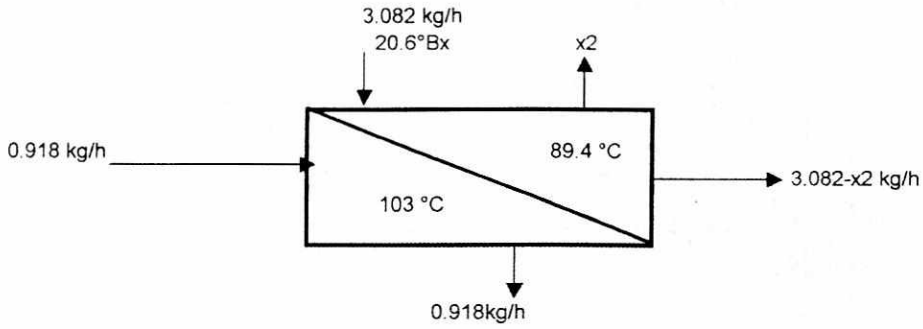


Tabla 7.3  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	0.918	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	3.082	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	20.77	°Bx
	Capacidad calórica	0.875	kcal/kg**C
Agua condensada	Masa	0.918	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Calor latente	103.1	kcal/kg
Vapor generado	masa	x2	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	(3.082-x2)	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Capacidad calórica	0.875	kcal/kg**C

Tabla 7.4  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	587.52	
Jugo entrando	277.89	
<b>Energía entrando</b>	<b>865.41</b>	
Pérdida por Radiación		10.82
Agua condensada		94.65
Vapor generado		630.9*x2
Jugo saliendo		(3.082-x2)*0.874*89.4
<b>Energía saliendo</b>		<b>346.28+552.76x2</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$346.28 + 552.76x2 = 865.41$$

$$x2 = 0.939 \text{ kg/h de vapor generado}$$

**Jugo saliendo**

$$3.082 - 0.939 = 2.143 \text{ kg/h de jugo saliendo}$$

**Brix del jugo saliendo**

sólidos que entran son iguales a los sólidos que salen

$$\begin{aligned} \text{Sólidos entrando} &= 0.64 \text{ kg/h} \\ \text{Sólidos saliendo} &= 0.64 \text{ kg/h} \\ \text{Brix saliendo} &= 29.9 \text{ °Bx} \end{aligned}$$

**Balance energético y de materiales del tercer efecto**

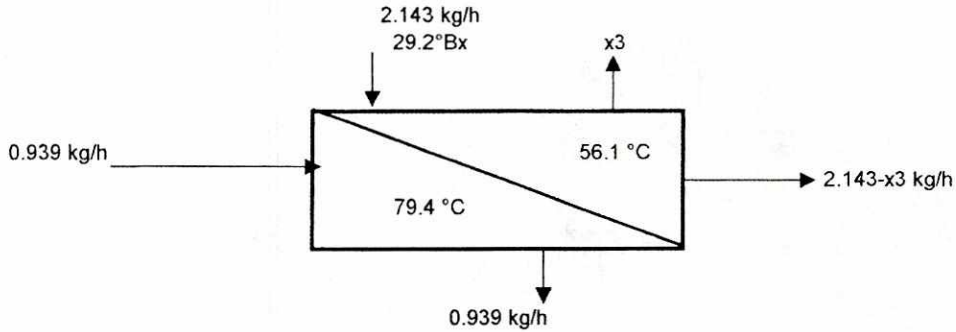


Tabla 7.5  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	0.939	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	2.143	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	29.86	°Bx
	Capacidad calórica	0.821	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	0.939	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Calor latente	89	kcal/kg
Vapor generado	masa	x3	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Entalpía	621.5	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	(2.143-x3)	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Capacidad calórica	0.821	kcal/kg*°C

Tabla 7.6  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	595.98	
Jugo entrando	157.25	
<b>Energía entrando</b>	<b>753.24</b>	
Pérdida por Radiación		9.42
Agua condensada		83.57
Vapor generado		621.5*x3
Jugo saliendo		(2.143-x3)*0.817*56.1
<b>Energía saliendo</b>		<b>191.21+575.66x3</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$191.21+575.66x3 = 753.24$$

$$x3 = 0.976 \text{ kg/h de vapor generado}$$

**Jugo saliendo**

$$2.143 - 0.976 = 1.167 \text{ kg/h de jugo saliendo}$$

**Brix del jugo saliendo**

sólidos que entran son iguales a los sólidos que salen

$$\text{Sólidos entrando} = 0.64 \text{ kg/h}$$

$$\text{Sólidos saliendo} = 0.64 \text{ kg/h}$$

$$\text{Brix saliendo} = 54.8 \text{ °Bx}$$

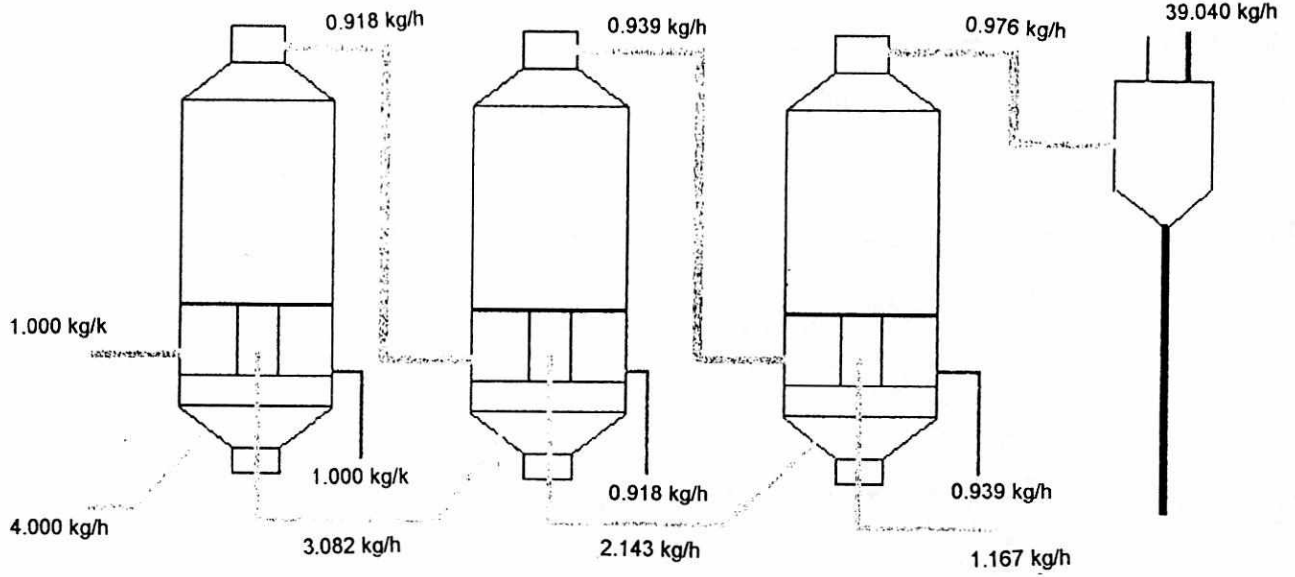


Figura 7.1  
Balance de materiales sistema sin extracciones

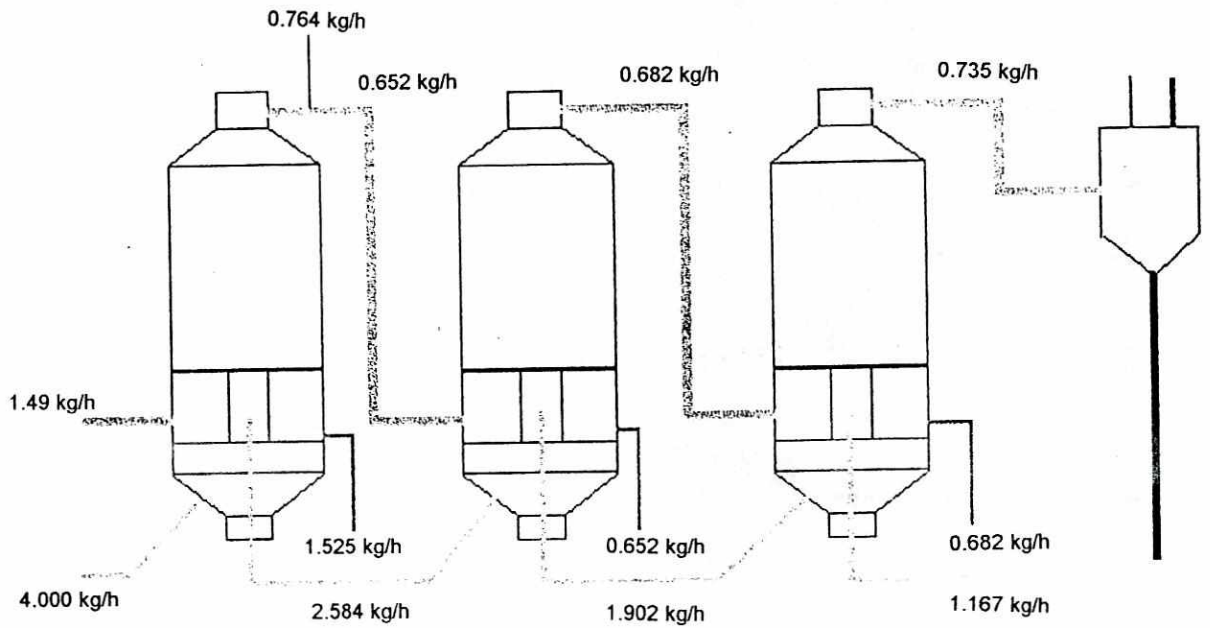


Figura 7.2  
Balance de materiales sistema con una extracción

Cálculo del balance de materiales con una extracción:

Con el balance de materiales y energía cuando no se tienen extracciones se tienen los parámetros básicos para poder iniciar el balance equivalente con una extracción de vapor en el primer vaso, dicho procedimiento se muestra a continuación:

*Evaporación total:*

$$W = m \cdot (1 - (B1/B2))$$

Donde W= agua evaporada

m= flujo de masa

B1= Brix a la entrada

B2 = Brix a la salida

$$W = 4(1 - (16/54.8)) = 2.833 \text{ kg/h}$$

Del principio de Rilleux para un arreglo de evaporación en serie de triple efecto se tiene el siguiente principio:

$$W = 3x + 3E3 + 2E2 + E1$$

Donde: x= vapor que va al condensador

E3= extracción en la tercera etapa

E2= extracción en la segunda etapa

E1= extracción en la primera etapa

Para este caso  $E_2=0$ ,  $x=0$ . Se necesitan 0.360 kg/h de vapor de la primera extracción (según Baloh) para los tachos y 0.269 kg/h de vapor de primera extracción para el calentamiento del jugo alcalizado (cálculo mostrado más adelante) con lo que se tiene:

$$E_1 = 0.360 + 0.269 = 0.629 \text{ kg/h}$$

Entonces,

$$W = 2.833 = 3x + 0.629$$

$$x = 0.735 \text{ kg/h de vapor al condensador}$$

En el tercer efecto se tiene los siguientes flujos másicos:

$$\text{Jugo saliendo: } 4.000 - 2.833 = 1.167 \text{ kg/h}$$

$$\text{Brix saliendo: } 54.8^\circ\text{Bx}$$

$$\text{Temperatura: } 56.1^\circ\text{C}$$

El jugo entrando al tercer efecto es:

$$\text{Jugo entrando 3er efecto} = \text{jugo saliendo} + \text{evaporación}$$

$$= 1.167 + 0.735 = 1.902 \text{ kg/h}$$

Con estos datos ya se calcula el balance de materiales y energía presentados a continuación con el procedimiento ya mostrado para el balance del triple efecto sin extracciones:

**Balance energético y de materiales del tercer efecto**

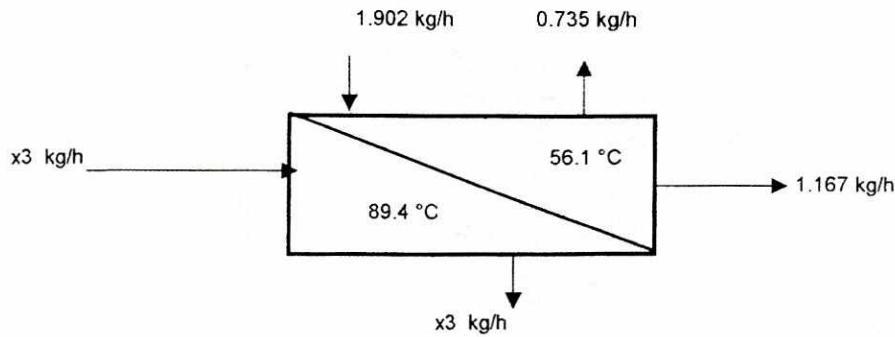


Tabla 7.7  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	1.902	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	33.6	°Bx
	Capacidad calórica	0.798	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Calor latente	89	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.735	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Entalpía	621.5	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.167	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Brix	54.8	°Bx
	Capacidad calórica	0.671	kcal/kg*°C

Tabla 7.8  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	634.7x3	
Jugo entrando	135.74	
<b>Energía entrando</b>	<b>634.7x3+135.74</b>	
Pérdida por Radiación		(634.7x3+135.74)0.0125
Agua condensada		89.4x3
Vapor generado		456.80
Jugo saliendo		43.94
<b>Energía saliendo</b>		<b>502.44+97.33x3</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$502.44+97.33x3 = 634.7x3+135.74$$

$$x3 = 0.682 \text{ kg/h de vapor entrando}$$

**Balance energético y de materiales del segundo efecto**

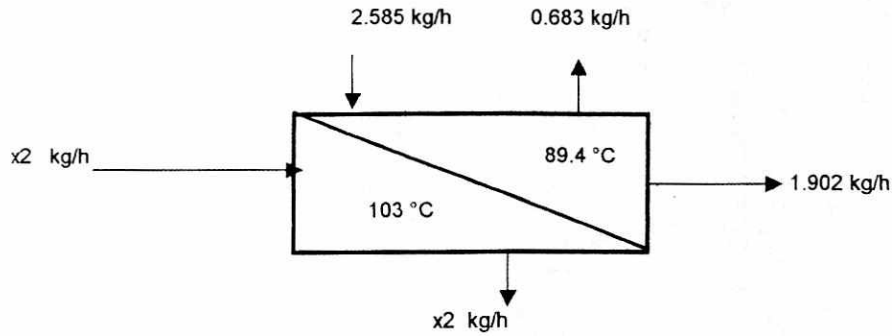


Tabla 7.9  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	2.584	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	24.7	°Bx
	Capacidad calórica	0.852	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Calor latente	103.1	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.682	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.902	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	33.6	°Bx
	Capacidad calórica	0.798	kcal/kg*°C

Tabla 7.10  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	640x2	
Jugo entrando	226.67	
<b>Energía entrando</b>	<b>640x2+226.67</b>	
Pérdida por Radiación		(640x2+226.67)0.0125
Agua condensada		103.1x2
Vapor generado		433.12
Jugo saliendo		135.74
<b>Energía saliendo</b>		<b>571.69+111.10x2</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$571.69+111.10x2 = 640x2+226.67$$

$$x2 = 0.652 \text{ kg/h de vapor entrando}$$

**Balance energético y de materiales del primer efecto**

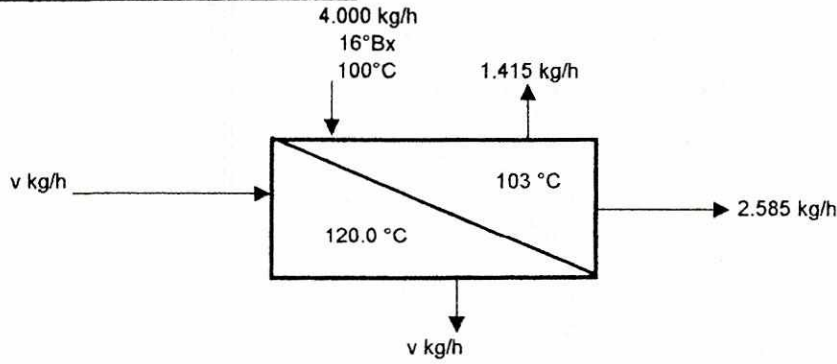


Tabla 7.11  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Entalpía	646	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	4.000	kg/h
	Temperatura	100	°C
	Brix	16.0	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Calor latente	120.3	kcal/kg
Vapor generado	masa	1.416	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	2.584	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	24.7	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C

Tabla 7.12  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	v*646	
Jugo entrando	361.60	
<b>Energía entrando</b>	<b>v*646+361.60</b>	
Pérdida por Radiación		(v*646+361.60)*.0125
Agua condensada		v*120.3
Vapor generado		905.99
Jugo saliendo		240.64
<b>Energía saliendo</b>		<b>1151.15+128.38v</b>

**Balance de energía**

**Vapor de escape**

$$1151.15+128.38v = v*646+361.60$$

$$v = 1.525 \text{ kg/h de vapor necesario a la entrada}$$

Cálculo del balance de materiales con dos extracciones

El procedimiento para alcanzar el balance de materiales y energía se obtuvo con el mismo esquema de cálculo que con el balance con una extracción, los resultados son los siguientes

Balance energético y de materiales del tercer efecto

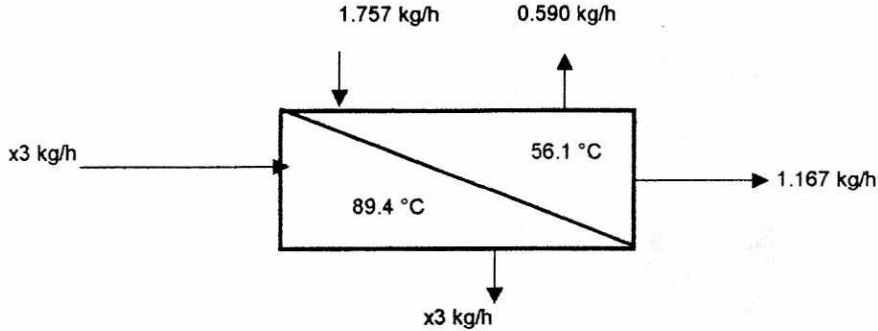


Tabla 7.13  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	1.757	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	36.4	°Bx
	Capacidad calórica	0.782	kcal/kg**C
Agua condensada	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Calor latente	89	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.590	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Entalpía	621.5	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.167	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Brix	54.8	°Bx
	Capacidad calórica	0.671	kcal/kg**C

Tabla 7.14  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	634.7x3	
Jugo entrando	122.77	
<b>Energía entrando</b>	<b>634.7x3+122.77</b>	
Pérdida por Radiación		(634.7x3+122.77)0.0125
Agua condensada		89x3
Vapor generado		366.69
Jugo saliendo		43.94
<b>Energía saliendo</b>		<b>412.17+96.93x3</b>

Balance de energía

Vapor generado

$$412.17+96.93x3 = 634.7x3+122.77$$

$$x3= 0.538 \text{ kg/h de vapor entrando al efecto}$$

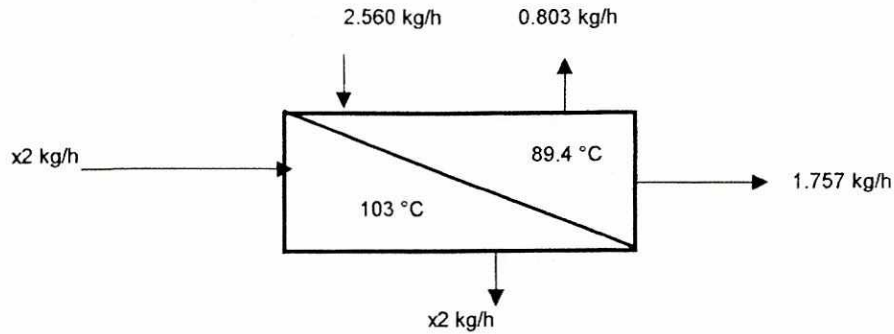
**Balance energético y de materiales del segundo efecto**

Tabla 7.15  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	2.560	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	22.60	°Bx
	Capacidad calórica	0.864	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Calor latente	103.1	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.803	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.757	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	36.4	°Bx
	Capacidad calórica	0.782	kcal/kg*°C

Tabla 7.16  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	640x2	
Jugo entrando	227.94	
<b>Energía entrando</b>	<b>640x2+227.94</b>	
Pérdida por Radiación		(640x2+227.94)0.0125
Agua condensada		103.1x2
Vapor generado		509.76
Jugo saliendo		122.77
<b>Energía saliendo</b>		<b>635.38+111.10x2</b>

**Balance de energía****Vapor generado**

$$635.38+111.10x2 = 640x2+227.94$$

$$x2 = 0.770 \text{ kg/h de vapor ingresando al efecto}$$

**Balance energético y de materiales del primer efecto**

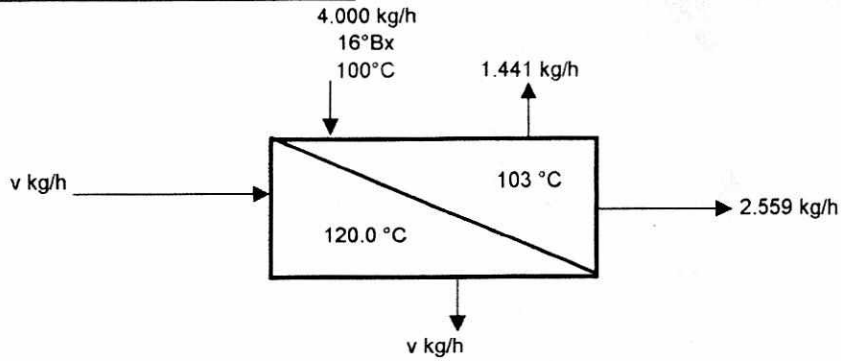


Tabla 7.17  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Entalpía	646	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	4.000	kg/h
	Temperatura	95	°C
	Brix	16	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Calor latente	120.3	kcal/kg
Vapor generado	masa	1.440	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	2.560	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	25.00	°Bx
	Capacidad calórica	0.850	kcal/kg*°C

Tabla 7.18  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	v*646	
Jugo entrando	343.52	
<b>Energía entrando</b>	<b>v*646+343.52</b>	
Pérdida por Radiación		(v*646+343.52)*.0125
Agua condensada		v*120.3
Vapor generado		921.51
Jugo saliendo		224.14
<b>Energía saliendo</b>		<b>1149.94+128.38v</b>

**Balance de energía**

**Vapor de escape**

$$1149.94+128.38v = v*646+343.52$$

$$v = 1.558 \text{ kg/h de vapor de escape necesario}$$

Cálculo del balance de materiales con tres extracciones

Este balance se hace con el mismo esquema de cálculo presentado para los dos últimos casos. Los resultados se presentan a continuación:

Balance energético y de materiales del tercer efecto

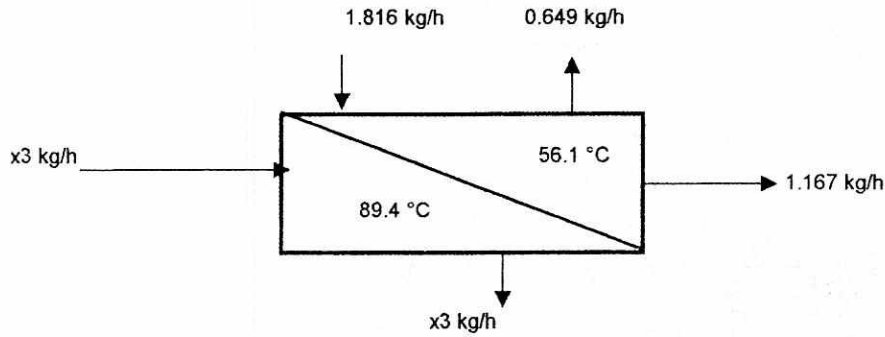


Tabla 7.19  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	1.816	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	35.2	°Bx
	Capacidad calórica	0.789	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	x3	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Calor latente	89	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.649	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Entalpía	621.5	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.167	kg/h
	Temperatura	56.1	°C
	Brix	54.8	°Bx
	Capacidad calórica	0.671	kcal/kg*°C

Tabla 7.20  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	634.7x3	
Jugo entrando	128.05	
<b>Energía entrando</b>	<b>634.7x3+128.05</b>	
Pérdida por Radiación		(634.7x3+128.05)0.0125
Agua condensada		89x3
Vapor generado		403.35
Jugo saliendo		43.94
<b>Energía saliendo</b>		<b>448.89+92.66x3</b>

Balance de energía

Vapor generado

$$448.89+92.66x3 = 634.7x3+128.05$$

$$x3 = 0.592 \text{ kg/h de vapor entrando}$$

**Balance energético y de materiales del segundo efecto**

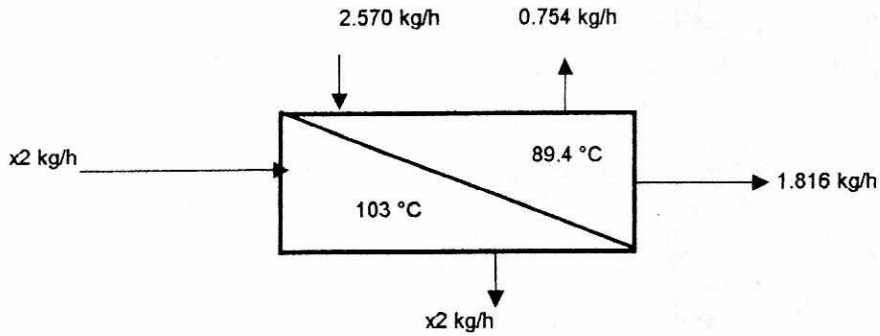


Tabla 7.21  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	2.570	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	24.9	°Bx
	Capacidad calórica	0.851	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	x2	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Calor latente	103.1	kcal/kg
Vapor generado	masa	0.754	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Entalpía	634.7	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	1.816	kg/h
	Temperatura	89.4	°C
	Brix	35.2	°Bx
	Capacidad calórica	0.789	kcal/kg*°C

Tabla 7.22  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	640x2	
Jugo entrando	225.19	
<b>Energía entrando</b>	<b>640x2+225.19</b>	
Pérdida por Radiación		(640x2+225.19)0.0125
Agua condensada		103.1x2
Vapor generado		478.56
Jugo saliendo		128.05
<b>Energía saliendo</b>		<b>609.43+111.10x2</b>

**Balance de energía**

**Vapor generado**

$$609.43+111.10x2 = 640x2+225.19$$

$$x2= 0.726 \text{ kg/h de vapor entrando}$$

**Balance energético y de materiales del primer efecto**

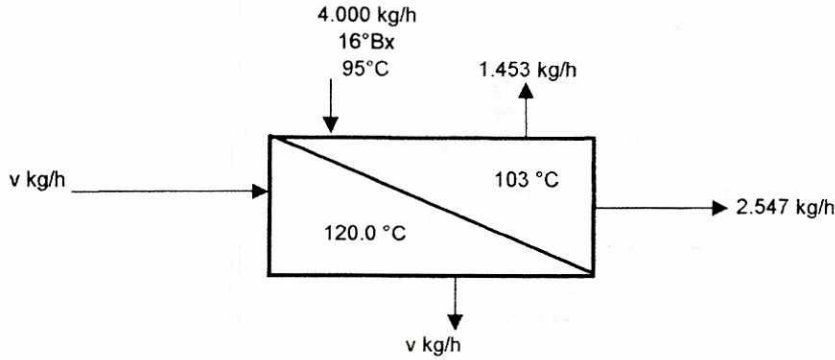


Tabla 7.23  
Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Entalpía	646	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	4.000	kg/h
	Temperatura	95	°C
	Brix	16	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg*°C
Agua condensada	Masa	v	kg/h
	Temperatura	120	°C
	Calor latente	120.3	kcal/kg
Vapor generado	masa	1.430	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Entalpía	640	kcal/kg
Jugo saliendo	masa	2.570	kg/h
	Temperatura	103	°C
	Brix	24.9	°Bx
	Capacidad calórica	0.851	kcal/kg*°C

Tabla 7.24  
Balance de Energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor entrando	v*646	
Jugo entrando	343.52	
<b>Energía entrando</b>	<b>v*646+343.52</b>	
Pérdida por Radiación		(v*646+343.52)*.0125
Agua condensada		v*120.3
Vapor generado		915.20
Jugo saliendo		225.16
<b>Energía saliendo</b>		<b>1144.65+128.38v</b>

**Balance de energía**

Vapor de escape

$$1144.65+128.38v = v*646+343.52$$

$$v = 1.548 \text{ kg/h de vapor necesario a la entrada}$$

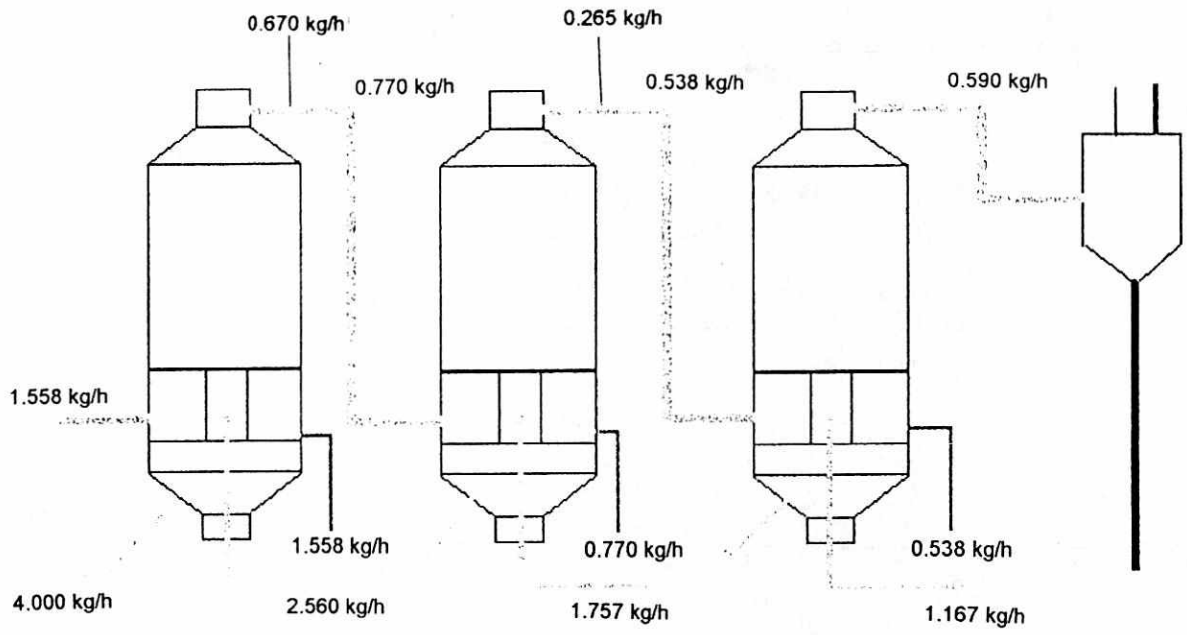


Figura 7.3  
Balance de materiales sistema con dos extracciones

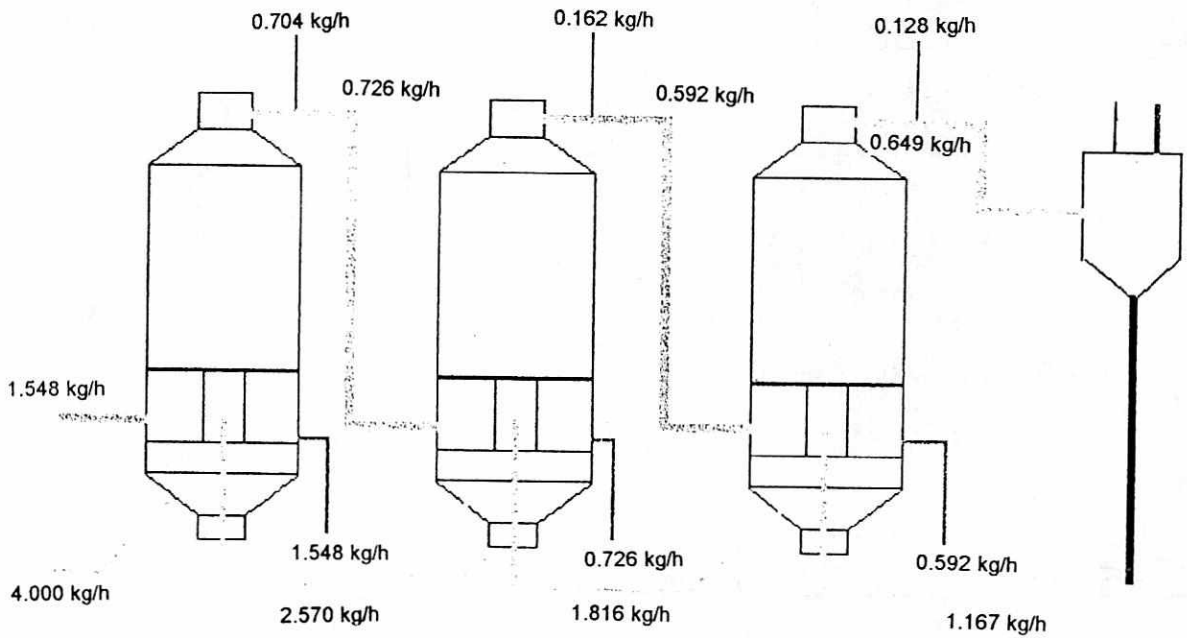


Figura 7.4  
Balance de materiales sistema con tres extracciones

Cálculo del vapor para los calentadores de jugo  
Sistema sin extracciones:

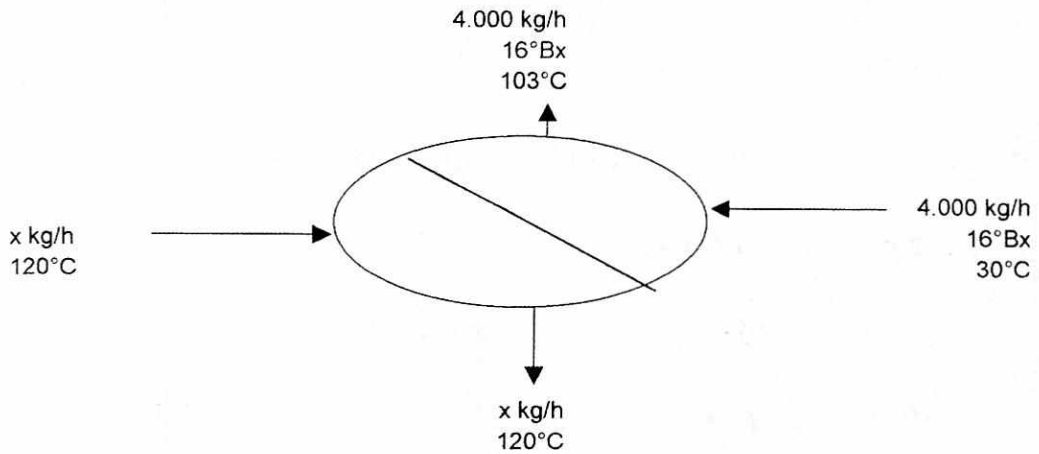


Tabla 7.25  
 Datos Iniciales

Componente	Dato	Magnitud	Dimensional
Vapor entrando	Masa	x	kg
	Temperatura	120	°C
	Entalpía	646	kcal/kg
Jugo entrando	Masa	4.000	kg
	Temperatura	30	°C
	Brix	16	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg °C
Agua condensada	Masa	x	kg
	Temperatura	120	°C
	Calor latente	120.3	kcal/kg
Jugo saliendo	Masa	4.000	kg
	Temperatura	103	°C
	Brix	16	°Bx
	Capacidad calórica	0.904	kcal/kg °C

Tabla 7.26  
 Balance de energía

Componente	kcal/h Entrando	kcal/h Saliendo
Vapor que entra	$x \cdot 646$	
Jugo que entra	108.48	
<b>Energía que entra</b>	<b><math>108.48 + 646x</math></b>	
Agua condensada		$x \cdot 120.3$
Jugo que sale		372.45
<b>Energía saliendo</b>		<b><math>372.45 + 120.3x</math></b>

Balance de energía

$$108.48 + 646x = 372.45 + 120.3x$$

$$x = 0.502 \text{ kg/h de vapor}$$

Sistema con una extracción:

Se calculó de la misma manera que en el sistema anterior únicamente tiene ahora un primer calentamiento con vapores de la primera extracción y un segundo calentamiento con escape:

**Primer calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: primera extracción  $T = 103.0^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $30^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $70^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $70 - 30 = 40^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 1ª extracción: 0.269 kg/h

**Segundo calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: escape  $T = 120.0^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $70^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $100^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $100 - 70 = 30^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de escape: 0.227 kg/h

Sistema con dos extracciones:

**Primer calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: segunda extracción  $T = 89.1^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $30^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $70^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $70 - 30 = 40^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 2ª extracción: 0.265 kg/h

**Segundo calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: primera extracción  $T = 103.0^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $70^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $100.0^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $100 - 70 = 30^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 1ª extracción: 0.202 kg/h

Sistema con tres extracciones:**Primer calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: tercera extracción  $T = 56.1^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $30^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $50^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $50 - 30 = 20^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 3ª extracción: 0.128 kg/h

**Segundo calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: segunda extracción  $T = 89.1^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $50^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $70^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $70 - 50 = 20^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 1ª extracción: 0.162 kg/h

**Tercer calentamiento:**

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: primera extracción  $T = 103.0^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $70^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $100.0^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $100 - 70 = 30^{\circ}\text{C}$

→ Vapor necesario de la 1ª extracción: 0.202 kg/h

Calentador de jugo claro:

Flujo de masa de jugo: 4.000 kg/h

Vapor: escape  $T = 120.0^{\circ}\text{C}$

Temperatura inicial jugo:  $95.0^{\circ}\text{C}$  Temperatura final jugo:  $100.0^{\circ}\text{C}$

Elevación de temperatura:  $100.0 - 95.0 = 5^{\circ}\text{C}$

→ *Vapor necesario de escape: 0.030 kg/h*

Este vapor se aplica para todos los sistemas.

Tabla 7.27  
Resultados obtenidos de los balances

Componente	Etapas	Sistema 1 extracción	Sistema 2 extracción	Sistema 3 extracción	Sistema sin extracción		
Consumo de vapor de escape (kg/h)	Calentamiento jugo alcalizado	0.227	0.000	0.000	0.502		
	Calentamiento jugo claro	0.030	0.030	0.030	0.030		
	Vapor para el 1er vaso	1.525	1.558	1.548	1.000		
Vapor de escape equivalente con el vapor de la extracción a tachos (kg/h)	Dato preliminar	1.782	1.588	1.578	1.532		
	Vapor de escape equivalente para una extracción				0.490		0.665
	Para dos extracciones para tres extracciones				(1)	(2)	0.727
Vapor al condensador kg/h	<b>Escape total consumido</b>	1.782	1.588	1.578	2.022		(3) 2.259
	% Ahorro de vapor de escape	11.9	27.7	30.1			
	Flujo	0.735	0.590	0.521	0.976		
	% Disminución	24.7	39.5	46.6			

- (1) Escape total con el vapor equivalente del vapor de primera extracción con el sistema de 1 extracción  
(2) Escape total con el vapor equivalente del vapor de primera extracción con el sistema de 2 extracción  
(3) Escape total con el vapor equivalente del vapor de primera extracción con el sistema de 3 extracción

### Cálculo de la cantidad de agua para los condensadores

En los balances de materiales se observó que la incorporación de extracciones de vapor entre los vasos de la serie disminuyen la cantidad de gases que se recolectan en el condensador barométrico para condensarlos y mantener la presión absoluta en el último vaso de la serie.

La cantidad de agua recomendada por muchos autores de la materia es de 40 libras de agua por cada libra de vapor entrando al condensador (40 kg de agua por kilogramo de vapor), por lo que para los sistemas propuestos las cantidades de agua son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 7.28

Agua necesaria para el condensador por cada 4 kg/h de jugo

Sistema	Vapor kg/h	kg agua/kg vapor	kg agua /h
Sin extracciones	0.976	40.0	39.040
Una extracción	0.735	40.0	29.400
Dos extracciones	0.590	40.0	23.600
Tres extracciones	0.521	40.0	20.840

A continuación se presenta la curva del consumo del agua de inyección en los condensadores barométricos de un evaporador

Gráfica de agua de inyección a condensadores

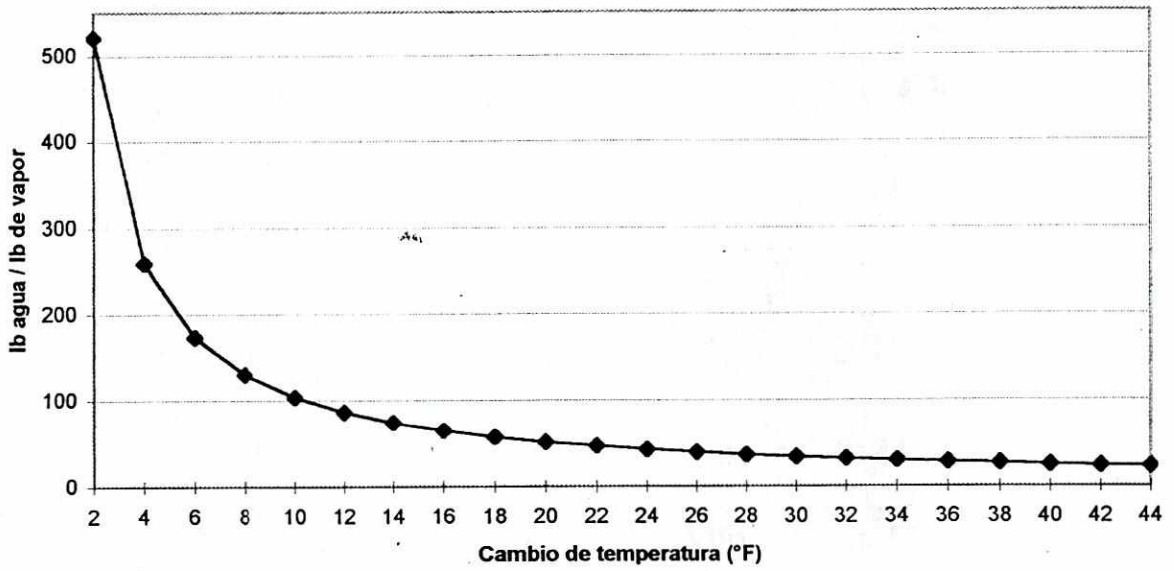


Figura 7.5 Curva de agua de inyección en condensadores barométricos

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cada vez es más evidente la necesidad de hacer más eficientes los procesos industriales, para poder posicionar los productos derivados de dicho proceso en mejores condiciones competitivas, en estos tiempos en donde la globalización de mercados ya es un hecho.

El Ingeniero de Proceso tiene como objetivo primordial el maximizar la producción con la utilización mínima de recursos para disminuir de esa manera los costos de operación, sin dejar de tomar en cuenta el recurrir a tecnologías limpias.

En un Ingenio Azucarero el consumo de vapor es parte vital en el movimiento de maquinaria así como también de energía para transformar los materiales de un estado a otro. Es por ello, que la energía proporcionada por el vapor debe ser la mejor utilizada debido a que de ella depende la mejora en las utilidades de la operación de la planta. Por ejemplo, en un Ingenio Azucarero que posea instalaciones para cogenerar energía eléctrica, es más rentable la quema de bagazo

(combustible usual en las calderas de los Ingenios en tiempo de Zafra) en las calderas de cogeneración que usualmente son más modernas y eficientes que las instaladas para servicio del Ingenio. Por ello un ahorro en el consumo de vapor dentro de la Fábrica representará más energía térmica disponible para generar energía eléctrica. En sí, dentro del análisis de los arreglos en un sistema de evaporación de triple efecto, se observó que la incorporación de un sistema de extracciones de vapor entre una etapa y la siguiente, representa un ahorro significativo en el consumo global de vapor de escape en la operación del Ingenio, lo que conllevará a una mayor cantidad de energía a la sección de cogeneración.

Como se muestra en la tabla 7.28, se observa que al incorporar una extracción de vapor entre el primer vaso y el segundo de la serie, se logra un ahorro aproximado de 11.9% en el consumo global de vapor de escape en el proceso. Además, se puede instalar una segunda extracción de vapor entre el segundo y tercer vaso de la serie, obteniendo consigo un ahorro global del consumo de vapor de escape del orden del 27.7%. Por último, al incorporar una tercera extracción entre el tercer vaso de la serie y el condensador se obtiene un ahorro global de vapor de escape del 30.1%.

Se observa que con los arreglos anteriormente señalados, sí se logra un ahorro en el consumo global de vapor de escape en el sistema, aunque al incorporar la tercera extracción, el ahorro obtenido ya no es tan grande respecto del sistema con dos extracciones. La diferencia es de un 2.4% del consumo global de vapor de escape respecto del sistema sin extracciones de vapor. Cabe mencionar, que al incorporar las extracciones de vapor no se modificaron las características de la meladura obtenida.

Las extracciones de vapor obtenidas entre las etapas del triple efecto, es energía disponible para otras etapas del proceso, en lugar de utilizar vapor de escape para los mismos. El vapor de la primera extracción es un vapor con una temperatura aproximada de 93°C que se puede utilizar como segundo calentamiento del jugo alcalizado y para los tachos. El vapor de la segunda extracción es un vapor de 79°C que se puede utilizar para el primer calentamiento del jugo alcalizado. Por último, el vapor de la extracción que tiene 56°C se puede utilizar para calentar el jugo alcalizado desde la temperatura a la que viene de molinos hasta aproximadamente 47°C.

Algo que debe quedar claro es que al utilizar vapores menos calientes en los equipos, se disminuye el riesgo de incrustaciones en los mismos. Esto ayuda a aumentar el tiempo en servicio de los equipos proporcionando una reducción en los insumos para la limpieza y mano de obra al mismo tiempo de prolongar la vida de los equipos por menor número de limpiezas causando menos desgaste.

Otro punto importante, es la cantidad de agua de enfriamiento que va al condensador necesario para condensar el flujo de vapor que va al mismo. Al incorporar una extracción de vapor al sistema se obtuvo una reducción del agua de enfriamiento del orden del 24.7% respecto del sistema sin extracciones. De la misma manera para dos extracciones de vapor en el sistema la reducción en el consumo de agua de enfriamiento es de 39.5%. Por último para tres extracciones de vapor en el sistema la disminución de la cantidad de agua de enfriamiento es de 46.6%. Debe aclararse que la cantidad de vapor que va al condensador en el sistema con tres extracciones, puede reducirse considerablemente pero existe el problema que la tubería y los aparatos para condensar ese vapor para aprovecharlo en el calentamiento de otro líquido son muy grandes debido a que el vapor a

la presión absoluta del último efecto, 2.4 psia, tiene un volumen específico muy grande.

Con todo lo anterior la incorporación de extracciones de vapor en un sistema de evaporación de triple efecto representa varios beneficios como:

- Menor consumo global de vapor de escape en el sistema.
- Menor consumo de energía eléctrica para bombeo de agua de enfriamiento.
- Menor cantidad de agua descargada a los efluentes, la cual posee una mayor temperatura de la que tenía antes de entrar al sistema (contaminación térmica).

Como se observó anteriormente, el sistema de implementación de extracciones de vapor tiene ventajas tanto en el ámbito económico como en el ambiental en la reducción de contaminación térmica a los efluentes. La contaminación térmica es uno de los puntos más importantes ya que cada vez la contaminación generada por las industrias se verán más reguladas y auditadas.

Además, implementar tecnologías limpias en la Industria Azucarera creará ventajas competitivas para los productos que ya están en el comercio mundial en esta era de la globalización.

## IX. CONCLUSIONES

1. La utilización de extracciones de vapor en una serie de evaporación de triple efecto disminuye el consumo global de vapor de escape en la operación del Ingenio Azucarero entre un 11 a 30% de lo que se necesitaría si la serie no tuviera extracciones, dependiendo de la cantidad de extracciones utilizadas.
2. La utilización de extracciones de vapor en una serie de evaporación de triple efecto, disminuye el consumo de agua de enfriamiento en los condensadores de los gases del último efecto entre un 24 a 46%, dependiendo de la cantidad de extracciones utilizadas.
3. La utilización de la tercera extracción en el último efecto en la serie de evaporación, no representa una diferencia en el ahorro del consumo global de vapor de escape respecto del sistema con dos extracciones. Aunque para el ahorro del consumo de agua de enfriamiento sí lo es.

4. Se observó que con el sistema de extracciones de vapor la utilización del vapor dentro de la fábrica se mejora en eficiencia y se dan lugar a una mayor disponibilidad de vapor para otros usos como lo es la cogeneración de energía eléctrica.
  
5. El uso de vapores de las extracciones entre efectos de la serie ayuda a consumir vapores de menor temperatura en los calentadores de jugo ayudando así a la disminución de la incrustación de los mismos.
  
6. La utilización de las extracciones de vapor entre los vasos de la serie de evaporación disminuye el consumo de energía eléctrica necesaria para el bombeo del agua de enfriamiento para los condensadores de los gases del último efecto.

## X. RECOMENDACIONES

1. Debe contarse con que los valores obtenidos en los cálculos de los balances de energía toman en cuenta cierto porcentaje de pérdidas en el sistema, el cual debe ajustarse a cada sistema en particular al tomar la decisión de instalar las extracciones recomendadas.
2. Se observa que los ahorros del consumo de vapor de escape en el proceso no varía considerablemente entre los sistemas propuestos de dos y tres extracciones, por lo que se puede sugerir instalar únicamente dos si el objetivo primordial es el ahorro de vapor.
3. Si se desea reducir considerablemente el consumo de agua de enfriamiento en los condensadores de los gases del último efecto, debe considerarse instalar la última extracción de vapor en el tercer vaso, pero al mismo tiempo debe hacerse un análisis de costo-beneficio para la toma de la decisión de instalar los equipos necesarios para la utilización de dicho vapor ya que su volumen

específico a 2.4 psia es muy alto en comparación con los volúmenes específicos de los gases de los vasos anteriores.

4. Debe evaluarse en cada fábrica, el óptimo uso de los vapores obtenidos de las extracciones, para su mayor aprovechamiento según el esquema de trabajo y la operación de cada Ingenio Azucarero.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- XI.1 Baloh, T. Y E. Wittwer. 1995. Energy Manual for Sugar  
Factories. Bartens. Alemania.
- XI.2 Chen, J. 1991. Manual del Azúcar de Caña. Limusa.  
México.
- XI.3 Colombia. 1997. Memorias IV Congreso Colombiano de  
la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar. Cali.
- XI.4 Himmelblau, D. 1988. Balances de Materia y Energía.  
Prentice Hall. Hispanoamericana. 4ª Edición. México.
- XI.5 Hugot, E. Handbook of Cane Sugar Engineering.  
Elsevier Co. 2<sup>nd</sup> Edition, 1960. Amsterdam.
- XI.6 Mortimer, C. 1983. Química. Grupo Editorial  
Iberoamericana. México.
- XI.7 Perry, R. et. al. 1984. Perry's Chemical Engineer's  
Handbook. McGraw Hill. 6<sup>th</sup> Edition. New York.
- XI.8 Van Ness, S. 1989. Introducción a la Termodinámica en  
Ingeniería Química. 4ª Edición. McGraw Hill. México.

