

TÍTULO: MODELO MATEMÁTICO PARA EVALUAR EL CLARIFICADOR MODIFICADO A GUARDIÁN, Y MONTAJE DE UN BTR EN EL CENTRAL AMÉRICA LIBRE.

TITLE: MATHEMATICAL MODEL TO EVALUATE THE MODIFIED CLARIFIER TO GUARDIAN, AND ASSEMBLY OF A BTR IN THE CENTRAL FREE AMERICA.

Autor: Ing. Alberto Leyva Ramos.

Afiliación de base: ATAC (Asociación de técnicos azucareros de Cuba).
Empresa Azucarera Santiago de Cuba.
UEB. Central azucarero “América Libre”

E.mail: alberto.leyva@america.azcuba.cu
Laboratorio.industria@america.azcuba.cu

Resumen:

En el presente trabajo se exponen los resultados del análisis realizado en el área de purificación del jugo durante la zafra 2012 en el Central Azucarero "América libre" con vistas a evaluar la modificación hecha al clarificador DTC - Oriente de 120 000 galones, convirtiéndolo en tipo Guardián a 77 000 galones, que es un clarificador de bajo tiempo de residencia del jugo por sus características de diseño, haciendo referencia fundamentalmente a los resultados obtenidos en los primeros quince días del mes de Marzo. Se hace un estudio del tiempo de residencia para clarificadores de la industria azucarera con alimentación periférica y central, a partir de un modelo matemático, deduciéndose en un esquema físico simplificado las ecuaciones para predecir el tiempo de residencia de los jugos claros y la cachaza. Se hace además un análisis comparativo de los tiempos de residencia en clarificadores multibandejas con alimentación central y periférica, y los del tipo BTR. Estos modelos nos han permitido determinar los tiempos de residencia de una forma más exacta que por el método del tiempo de llenado o Holding Time. Se ha podido demostrar que calculando el tiempo de residencia de los jugos teniendo en cuenta el tiempo de llenado únicamente y el volumen del clarificador fluyendo el jugo como un flujo pistón, no nos da un valor real, ya que no tiene en cuenta la extracción de jugo por bandejas ni la cachaza, y realizando los cálculos utilizando el modelo matemático si se tienen en cuenta estas extracciones.

Summary.

Presently work the results of the analysis are exposed carried out in the area of purification of the juice during the harvest 2012 in the Sugar Power station "free America" with a view to evaluating the modification made to the clarifier DTC - it Guides of 120 000 gallons, transforming it into Guardian type to 77 000 gallons that it is a clarifier of low time of residence of the juice for their design characteristics, making reference fundamentally to the results obtained in the first fifteen days of the month of March. A study of the time of residence is made for clarifiers of the sugar industry with outlying and central feeding, starting from a mathematical model, being deduced in a simplified physical outline the equations to predict the time of residence of the clear juices and the phlegm. It is also made a comparative analysis of the times of residence in clarifiers multibandejas with central and outlying feeding, and those of the type BTR. These models have allowed us to determine the times of residence in a more exact way that for the method of the time of having filled or Holding Time. He/she has been able to demonstrate that calculating the time of residence of the juices keeping in mind the time of having only filled and the volume of the clarifier flowing the juice like a flow piston, he/she doesn't give us a real value, since he/she doesn't keep in mind the extraction of juice for trays neither the phlegm, and carrying out the calculations using the mathematical pattern if they are kept in mind these extractions.

Introducción:

El proceso de fabricación de azúcar a partir de la caña es una secuencia de operaciones de separación de impurezas y agua por etapas. Desde que el jugo es extraído por los molinos hasta que el azúcar es separada en las centrifugas, los pasos intermedios no son mas que operaciones de purificación y concentración. En las etapas de purificación, la clarificación del jugo de caña resulta una de las operaciones mas importantes, pues es ahí donde se produce la separación de la mayor parte de las impurezas que acompañan al jugo. Para poder obtener buenos resultados en tales operaciones es imprescindible mantener el jugo a una temperatura y PH que permitan la rápida coagulación y decantación de las impurezas presentes. Ahora bien, el jugo de caña es un producto que fácilmente se descompone tanto por efectos biológicos como por vías de las reacciones químicas, y cuando el jugo es sometido a las condiciones de PH y temperatura que requiere esta etapa del proceso, se convierte en un medio idóneo para provocar y acelerar las descomposiciones antes citadas, invirtiéndose parte de la sacarosa presente, lo que constituye una pérdida para el proceso y por tanto una gran afectación a la eficiencia del ingenio. Uno de los factores fundamentales que contribuyen a que estas pérdidas ocurran lo constituye el tiempo de residencia del jugo de caña en el proceso ya que la descomposición del mismo es directamente proporcional al tiempo, de ahí la importancia que para mejorar la eficiencia en la productividad de azúcar tiene el disminuir en todo lo posible este tiempo, fundamentalmente en el área de purificación. Los clarificadores típicos de nuestra industria (y aún a aquellos a los que se le han introducido una serie de modificaciones buscando mayor eficiencia), trabajan con altos tiempos de retención o sea que el jugo permanece en ellos a un PH aproximadamente entre 6.8 y 7.2 y una temperatura entre 96 y 98 °C no menos de dos horas y según muchos investigadores, entre ellos Mc Allep, Cook y Bomonti, el % de sacarosa invertida en el medio con estas condiciones y durante este tiempo alcanza valores de 0.426%, esto representa una pérdida considerable. Como dato ilustrativo podemos decir que solo por este concepto en una zafra de 7.5 millones de toneladas métricas de azúcar se pierden 40000 toneladas. Teniendo en cuenta los criterios analizados anteriormente se diseñaron clarificadores cuya característica principal era tener un tiempo de retención lo mas bajo posible como vía de disminuir las pérdidas por inversión y por tanto aumentar la eficiencia del proceso y la calidad del azúcar, ya que los productos resultantes de la degradación de la sacarosa producen mucho daño en el resto del proceso, pues altera el color, aumenta las pérdidas en mieles, y es por eso que en el trabajo exponemos una evaluación a escala industrial del montaje de un CBTR y un clarificador DTC – Oriente modificado a Guardián. Además de hacer una evaluación del tiempo de residencia para diferentes tipos de alimentación al clarificador utilizando para esto modelos físicos matemáticos los cuáles se pueden aplicar y generalizar en la industria azucarera. En este trabajo se ha realizado un estudio basado en cálculos que nos han permitido conocer las capacidades existentes en clarificador sin modificar y ya modificado para poder realizar las evaluaciones y determinar los tiempos de residencia en los diferentes casos, para de esta forma poder hacer una evaluación económica real de las pérdidas que están ocurriendo dentro del clarificador por este concepto de tiempo de residencia del jugo.

1. Materiales y métodos utilizados:

1.2. Según (3, 4, 5,9)¹ Método de cálculo empleado actualmente en la industria azucarera cubana para determinar el tiempo de residencia en clarificadores. A continuación explicamos el algoritmo de cálculo empleado actualmente en la industria azucarera para determinar el tiempo de residencia del jugo dentro del clarificador y su afectación económica.

En la industria azucarera cubana hasta la fecha, el tiempo de residencia de los clarificadores es calculado a partir del tiempo de llenado, el cual no es mas que el tiempo de residencia calculado para un tanque cilíndrico por el cual fluye un liquido en flujo pistón en régimen estacionario, de manera que:

$$= V / Q \quad (1)$$

Según la ecuación empírica (2 - 1.2) las pérdidas por inversión de sacarosa dependen de la temperatura y el pH del jugo alcalizado. (Esta ecuación la vamos a utilizar para luego poder calcular las pérdidas y el valor económico).

$$P = (219818 - 6883 \times TJA + 54,6 \times T^2JA) \times e^{-2.14 \times pH} \quad (2)$$

Donde: pH JA, es pH del jugo alcalizado, TJA, es la temperatura del jugo alcalizado [°C], P, es la pérdida por inversión [% / h]

La influencia de las pérdidas por inversión en el rendimiento está dada por:

$$AR = \% Pol JA \times JA \times P \times TR / 0.96 \times C \times 100 \quad (3)$$

Donde AR, es la afectación al rendimiento [%], % Pol JA, es el por ciento de Pol en el jugo alcalizado [%], JA, es la cantidad de jugo alcalizado [TM / día], TR, es el tiempo de residencia en el clarificador [h], C, es la cantidad de caña molida por día [TM / día]

Balance de masa total alrededor de los molinos (Ecuación fundamental)

$$Caña + Agua = Bagazo + JM \quad JM = Caña + Agua - Bp \quad (4)$$

Determinación del agua añadida

$$A = (B \times JP - B \times JM) \times \% E \text{ Extracción} \times C / B \times Jp \quad (5)$$

Determinación del bagazo producido.

Pureza último jugo extraído = % Pol BAGAZO / B x BAGAZO

$$B \times bagazo = \% Pol BAGAZO / \text{Pureza último jugo extraído} \quad (6)$$

$$\% Fibra Bagazo = 100 - B \times BAGAZO - Humedad \quad (7)$$

Balance del bagazo en los molinos.

$$\% F bag \times BP = \% F caña \times C$$

$$B p = \% F CAÑA \times C / \% F BAG \quad (8)$$

Balance de masa total alrededor del tanque de alcalizar.

$$Lch + JM + JF = JA \quad (9)$$

Por un balance de Pol y masa en las pailas de alcalizar. % Pol JF x JF + % Pol JMZ

$$\% Pol JA = \% Pol JF \times JF + \% Pol JM \times JM / JA \quad (10)$$

$$JF = \frac{L CAL - JM \times (\% Pol JA)}{(\% Pol JA) - (\% Pol JM - 1)} \quad (11)$$

Donde: % Pol JF, es el por ciento de Pol en el jugo del filtro [%], % Pol JMZ, es el por ciento de Pol en jugo mezclado [%], JF, es la cantidad de jugo del filtro [TM / día], JMZ, es la cantidad de jugo mezclado [TM / día], Lch, es la cantidad de lechada de cal [TM / día], La cantidad de lechada de cal se calcula como:

$$Lch = C \times 100 \times d \times k / PZ cal \times e \times 1000 \quad (12)$$

¹Spencer Meade, Manual del Azúcar de Caña; Honing Pieter, "Principios de Tecnología Azucarera". T 1. Edición Revolucionaria Guantánamo (1987); Pedrosa pu erta R, "Fabricación de Azúcar crudo de Caña". Ed. Científico - técnica La Habana (1975). Manual de Operaciones de la industria Azucarera Tomo I y II.

Donde: a, es la cantidad de kilogramos de CaO por TM de caña molida [Kg. / TM]
K, peso en gramos de un litro de lechada de [cal g / l], E, gramos de CaO por litro de lechada de [calg / l]
PZ cal, es la pureza de la cal empleada [%].

El tiempo de residencia se calcula según la siguiente ecuación:

$$TR = \text{GAL C} / \text{GAL JA} \quad (13) \quad \text{GAL JA} = \text{JA} \times 1000 / 24 \times \text{PJA} \quad (14)$$

Donde: GAL C, son los galones que tiene el clarificador [GAL], GAL JA, son los galones de jugo alcalizado que se alimentan al clarificador [GAL / h], PJA, es la densidad del jugo alcalizado según su brix [Kg. / GAL]

El azúcar que se pierde o se recupera se calcula:

$$AZ = AR \times C \quad (15)$$

Donde AZ, es el azúcar perdida o recuperada [TM / día]

Luego el valor obtenido en la ecuación (15) se multiplica por los días de zafra y por el valor de venta del azúcar y se obtiene entonces la cantidad de dinero que se pierde o se recupera según sea el caso.

Como podemos ver en la ecuación (3) del cálculo de la afectación al rendimiento está implícito el tiempo de retención o residencia del jugo dentro del clarificador, donde podemos ver como a medida que aumentan las pérdidas de sacarosa por inversión dentro del clarificador debido al aumento del tiempo de retención, también aumenta la afectación al rendimiento y por tanto aumenta el azúcar perdido.

Hay que decir que también existen otros métodos de cálculo, como es el de trazadoras por ejemplo, pero en este caso vamos a estudiar el que se ha explicado anteriormente para hacer una comparación con el modelo matemático.

1.3 MODELO MATEMATICO PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN CLARIFICADORES MULTIBANDEJAS CON ALIMENTACIÓN CENTRAL Y PERIFERICA.

1.3.1. Resumen del modelo matemático.

En este trabajo se hace un estudio del tiempo de residencia para clarificadores multibandejas de la industria azucarera con alimentación central y periférica, deduciéndose a partir de un modelo físico simplificando las ecuaciones para predecir el tiempo de residencia de los jugos claros y la cachaza, además de un análisis comparativo entre los dos tipos de alimentación.

1.3.2. Introducción del modelo matemático.

Uno de los problemas actuales más importantes en los procesos de purificación de la industria azucarera es el concerniente al tiempo de residencia de los jugos. Los clarificadores multibandejas son equipos de gran volumen y con muy diversos diseños y por sus características operacionales resulta difícil la determinación de los tiempos de residencia de los jugos y la cachaza, de forma tal que para determinarlo es necesario realizar complejas corridas experimentales utilizando trazadoras u otros medios.

1.3.3. Análisis del tiempo de residencia en los clarificadores multibandejas².

En la industria azucarera cubana hasta la fecha, el tiempo de residencia de los clarificadores es calculado según ec (1-1.2). Sin embargo este modelo sencillo no tiene en cuenta que en el caso de los clarificadores existen extracciones de jugo en las cámaras intermedias, lo cual trae como consecuencia que el tiempo de residencia no es único, sino que depende del flujo y del lugar de extracción, existiendo múltiples tiempos de residencia.

1.3.3.1. Clarificadores con alimentación central.

² Ing. Emilio P Días García, CAI “Martínez Prieto”. Ciudad de la Habana . Julio 1996. Nuevo Bloque Tecnológico Para la Purificación del Guarapo. Mounduí, Rubén y José C. Bango. “Tiempo de Residencia en los clarificadores: Un Enfoque económico”, en Cuba Azúcar, Abril – Junio. No 2. Vol. XXVII. 1998. Pérez Maria del C. y Jorge Monteverde “Clarificador de Bajo Tiempo de Retención”, en Cuba Azúcar. Enero – Marzo. No. 1. Vol. XXVII. 1998.

Para el caso de los clarificadores con alimentación central el modelo matemático fue deducido a partir de los siguientes esquemas de flujo y modelo físico mostrado en la figura 1. De acuerdo con este modelo podemos suponer que el volumen de cada cámara está constituido por dos partes, una cámara principal que contiene el jugo claro y en proceso de sedimentación y otra que contiene el canal de distribución (tubo central) y la cachaza depositada. De acuerdo con esto se puede plantear un esquema para el modelo de flujo mostrado en la fig. 1b en el cual se señalan la cámara de distribución (Ca_i) y los compartimientos de jugo (C_i). Para este modelo se demuestra que para un clarificador de n bandejas, el tiempo de residencia de cada extracción de jugo claro puede expresarse por:

$$= Hd \left[Fca_i + \left(1 - \frac{Fca_i}{X_{ej}} + \frac{F_{ei}}{X_{ei}} \right) \right] \quad (2) \quad \begin{matrix} i \text{ desde } 1 \text{ hasta } n \\ j \text{ desde } 1 \text{ hasta } (n-1) \end{matrix}$$

El tiempo de residencia de la cachaza extraída de la última cámara, para tres bandejas, es:

$$t_{cach} = Hd \left[Fca_1 + Fca_2 / (1 - x_{e1}) + Fca_3 / (1 - x_{e1} - x_{e2}) + Fcach / (1 - x_{e1} - x_{e2} - x_{e3}) \right] \quad (3)$$

Las ecuaciones (1) y (2) permiten calcular los tiempos de residencia de cada una de las extracciones y de la cachaza, siendo el tiempo de residencia del jugo claro:

$$t_{medio} = \sum_i t_i * E_i / E_i \quad (4)$$

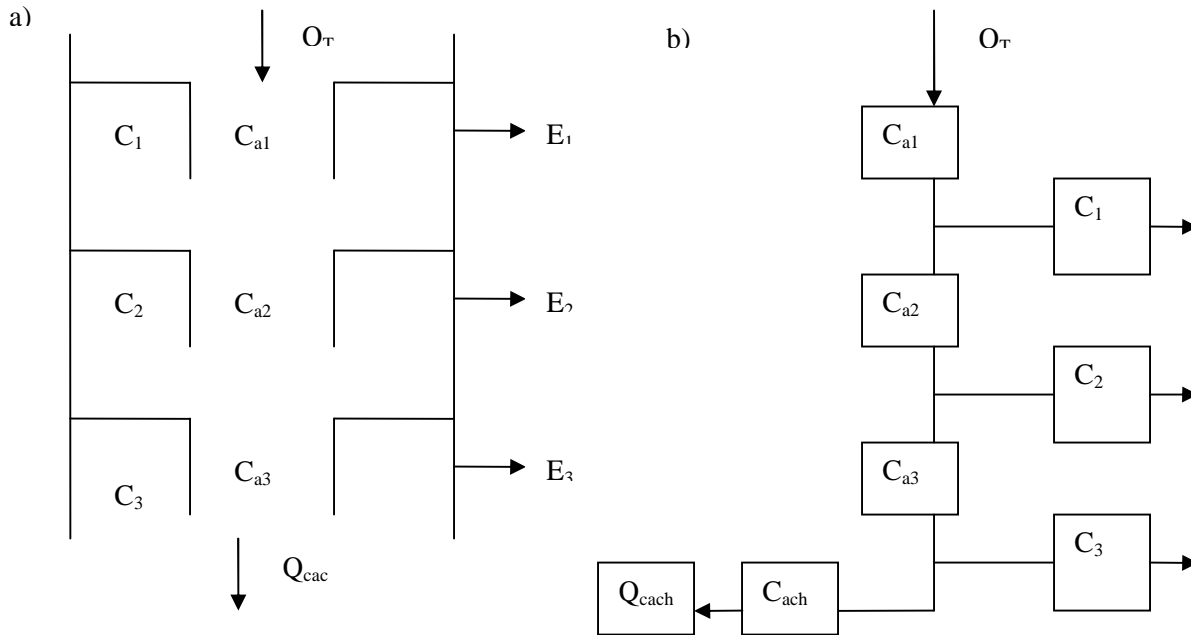


FIG. 1 Modelo físico y esquema de flujo para clarificadores con alimentación central

1.3.3.2. Clarificadores con alimentación periférica.

Para desarrollar el modelo matemático en clarificadores de alimentación periférica se tendrán en cuenta las mismas consideraciones que se plantearon para los equipos con alimentación central, siendo el modelo físico y el esquema de flujos los mostrados en la figura 2, utilizando como modelo un equipo de tres bandejas.

De acuerdo con el modelo de flujo, realizando un balance de flujo volumétrico se tiene que:

$$Q_I = Q_1 + Q_2 + Q_3 = E_1 + E_2 + E_3 + Q_{cach} \quad (5)$$

Denominamos X_i a la fracción del flujo total extraído en la cámara i .

$$X_i = E_i / Q_T \quad (6)$$

El tiempo de residencia del jugo claro extraído en la primera cámara será:

$$t_1 = V C_1 / Q_1 \quad (7)$$

Para el tiempo de residencia de la cachaza que sale de la bandeja 1 por el tubo central (comportamiento calculado en el modelo físico) se tiene que tener en cuenta el tiempo de residencia t_1 , y el tiempo que tendrá en la cámara auxiliar, de modo que: $t_1 = t_{c1} + V_{ca1}/Q_{ca1}$ (8)

Del mismo modo que el tiempo de residencia del jugo claro en la bandeja 2 será: $t_2 = V_{c2}/Q_2$ (9)

En el caso del tiempo de residencia t_3 de la cachaza que sale de la cámara auxiliar C_{a2} quedará definido por los tiempos de residencia de las corrientes de entrada más el tiempo de residencia que tendrá todo el flujo en la cámara auxiliar 2, de modo que:

$$t_3 = Q_{c2}/Q_{ca2} * t_2 + Q_{ca1}/Q_{ca2} * t_1 + V_{ca2}/Q_{ca2} \quad (10)$$

Donde:

$$Q_{ca2} = Q_{c2} + Q_{ca1} = Q_{c2} + Q_{c1} \quad (11)$$

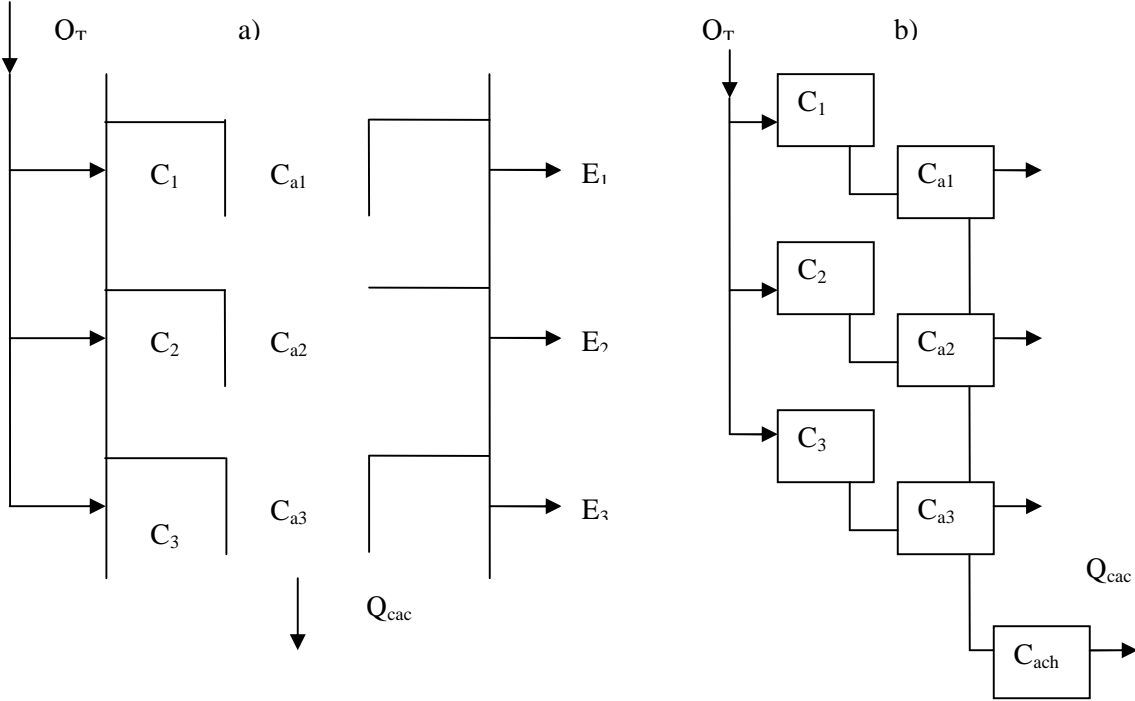


FIG. 2. Modelo físico y esquema de flujo para clarificadores con alimentación periférica

Del mismo modo se puede demostrar que para la cámara 3, el tiempo de residencia para el jugo claro será: $t_3 = V_{c3}/Q_3$ (12)

De la misma forma que para la cachaza que sale de la cámara de distribución Ca_2 , el tiempo de residencia para la cachaza que sale de la cámara auxiliar 3, quedará definido por la media pesada de los tiempos de residencia de las corrientes de entrada más el tiempo de residencia que tendrá todo el flujo en la cámara auxiliar 3, de modo que:

$$t_3 = Q_{ca2}/Q_{ca3} * t_2 + Q_{c3}/Q_{ca3} * t_3 + V_{ca3}/Q_{ca3} \quad (13)$$

$$\text{Donde: } Q_{ca3} = Q_{c3} + Q_{ca2} = Q_{c2} + Q_{c3} \quad (14)$$

El tiempo de residencia de la cachaza extraída de la última cámara será:

$$t_{cach} = t_3 + V_{cach}/Q_{ca3} \quad (15)$$

Como $Q_{ca3} = Q_{cach}$ y Q_{ca3} viene dado por la ecuación (14), la ecuación (15) se puede escribir:

$$t_{cach} = Q_{ca2}/Q_{cach} * t_2 + Q_{c3}/Q_{cach} * t_3 + V_{cach}/Q_{cach} \quad (16)$$

Estas ecuaciones generales pueden ser simplificadas teniendo en cuenta que en general la forma de operar estos equipos.

$$E_1 = E_2 = E_3 = Q_{claro} / 3 \quad (17)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_I / 3 \quad (18)$$

$$QC_3 = QC_2 = QC_1 = Q_{cach} / 3 \quad (19)$$

La ecuación para el tiempo de residencia de los jugos claros se puede escribir:

$$= 3V_c / Q_T \quad (20)$$

Teniendo en cuenta (19), las ecuaciones (8) y (10) quedan de la forma siguiente:

$$C_1 = C_1 + 3V_{cal} / Q_{cach} \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_2 + C_1 + 3V_{Ca2} / 2Q_{cach} \quad (22)$$

$$C_3 = \frac{2}{3} C_3 + \frac{1}{3} C_2 + V_{Ca3} / 3Q_{cach} \quad (23)$$

$$Q_{cach} = \frac{2}{3} C_2 + \frac{1}{3} C_3 + V_{Ca3} / 3Q_{cach} + V_{cach} / Q_{cach} \quad (24)$$

Si denominamos X_i a la fracción del flujo total extraído en un punto i dado:

$$X_i = E_i / Q_T \quad (25)$$

$$\text{Entonces para un clarificador de tres bandejas: } X_1 + X_2 + X_3 + X_{cach} = 1 \quad (26)$$

Llamando F_i a la fracción de volumen ocupado por la cámara i :

$$F_{c_i} = V_{c_i} / V_T \quad (27)$$

$$F_{ca_i} = V_{ca_i} / V_T \quad (28)$$

Entonces para las tres bandejas:

$$V_T = C_1 + V_{c_2} + V_{c_3} + V_{ca_1} + V_{ca_2} + V_{ca_3} + V_{cach} \quad (29)$$

$$F_{c_1} + F_{c_2} + F_{c_3} + F_{ca_1} + F_{ca_2} + F_{ca_3} + F_{cach} = 1$$

$$(F_{c_1}) + (F_{ca_1}) = (1 - F_{cach}) \quad (30)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (25), (27), (28), y (29) las ecuaciones del tiempo de residencia en este modelo pueden ser descritas en función del tiempo de llenado de la fracción volumen y fracción flujo.

Para la bandeja 1 se tiene que $Q_1 = Q_T / 3$, multiplicando y dividiendo por el volumen total:

$$\begin{aligned} t_1 &= 3V_{c_1}V_T / Q_TV_T = 3V_{c_1}V_T / Q_TV_T \\ &= 3F_{c_1}Hd \end{aligned} \quad (31)$$

Del mismo modo se puede demostrar que:

$$C_1 = 3Hd (F_{c_1} + F_{ca_1} / X_{cach}) \quad (32)$$

Del mismo modo en la bandeja 2

$$t_2 = 3F_{c_2}Hd \quad (33)$$

$$C_2 = \frac{3}{2} Hd [F_{c_1} + F_{c_2} + F_{ca_1} / X_{cach} + F_{ca_2} / X_{cach}] \quad (34)$$

Para la bandeja 3 se tiene que:

$$t_3 = 3F_{c_3} Hd \quad (35)$$

$$C_3 = Hd [F_{c_1} + F_{c_2} + F_{c_3} + F_{ca_1} / X_{cach} + F_{ca_2} / X_{cach} + F_{ca_3} / X_{cach}] \quad (36)$$

Para la cachaza que sale de la última cámara, la ecuación toma la siguiente forma:

$$Q_{cach} = Hd [F_{c_1} + F_{c_2} + F_{c_3} + F_{ca_1} / X_{cach} + F_{ca_2} / X_{cach} + F_{ca_3} / X_{cach}] \quad (37)$$

Las ecuaciones (31), (32) y (34) permiten determinar el tiempo de residencia de los jugos clarificados en cada una de las extracciones, el tiempo medio de residencia del jugo clarificado puede ser calculado por la ecuación:

$$t_m = F_{c_i}^* t_i / F_{c_i} \quad (38)$$

Para un clarificador con bandejas de iguales volúmenes en cada compartimiento, el tiempo de residencia en cualquiera de las bandejas viene dado por la ecuación:

$$= 3F_c Hd \quad (39)$$

El tiempo de residencia de la cachaza viene dado por la ecuación (37), para clarificadores con tres bandejas de idéntico volumen en cada uno de los compartimientos toma la forma simplificada:

$$Q_{cach} = 3Hd [F_c + ((F_{ca} + (F_{cach} / 3)) / X_{cach})] \quad (40)$$

2. Evaluación del clarificador de la Empresa Azucarera “América Libre”. Análisis del tiempo de residencia utilizando el modelo matemático.

2.1. Evaluación experimental:

Para la evaluación experimental que se realizó se escogieron los siguientes datos de proceso, los cuales fueron determinados teniendo en cuenta lo siguiente:

- Flujo total del jugo
- Flujo de cachaza
- pH del jugo alimentado y del jugo claro
- Brix y Pol del jugo alimentado y de jugo claro.

El flujo de jugo claro fue calculado a partir de mediciones realizadas del flujo de cachaza

El flujo de cachaza fue determinado experimentalmente mediante mediciones directas del tiempo en que tarda en llenarse un recipiente tarado previamente.

Luego mediante un balance de flujo volumétrico se determinó el flujo del jugo claro

Se supuso que el jugo claro extraído de cada bandeja era igual.

Las determinaciones de pH se realizaron utilizando un pH-metro eléctrico con apreciación de centésimas.

Los Brix y el % Pol fueron determinados a partir de las técnicas experimentales normadas en el MACU [1], los datos obtenidos en las evaluaciones experimentales luego de realizar varias corridas se muestran en la tabla I del anexo.

2.2 Análisis del tiempo de residencia en los clarificadores:

2.2.1. Selección del modelo de flujo. Según epígrafe (1.3.3.1)

2.2.1.1 Clarificadores con alimentación central:

Por un balance de flujo volumétrico. $Q_T = E_1 + E_2 + E_3 + Q_{cach}$ (5 – 1.3.3.2)

Si denominamos X_{ei} a la fracción del flujo total extraído en la cámara:

$$X_{ei} = E_i / Q_T \quad (6 – 1.3.3.2)$$

$$\text{Entonces: } X_{e1} + X_{e2} + X_{e3} + X_{cac} = 1 \quad (1)$$

También el flujo que pasa a través de cada cámara de distribución viene dado por:

$$Q_{ca1} = Q_t - E_1 \quad (2)$$

$$Q_{ca2} = Q_t - E_1 - E_2 \quad (3)$$

$$Q_{ca3} = Q_t - E_1 - E_2 - E_3 \quad (4)$$

Si llamamos F_i a la fracción de volumen ocupado por la cámara:

$$F_{ci} = V_{ci} / V_t \quad (5)$$

$$F_{cai} = V_{cai} / V_t \quad (6)$$

$$\text{Entonces si: } V_t = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + V_{ca1} + V_{ca2} + V_{ca3} + V_{cach} \quad (7)$$

$$F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + F_{ca1} + F_{ca2} + F_{ca3} + F_{cach} = 1 \quad (8)$$

$$E(F_{c1}) + E(F_{ca1}) = (1 - F_{cach}) \quad (9)$$

Suponiendo flujo pistón, el tiempo de residencia del jugo extraído en la primera cámara será:

$$= V_{ca1} / Q_t + V_{c1} / E_1 \quad (10)$$

Que expresado en función de X_{ei} y F_i será:

$$= F_{ca1} V_t / Q_t + F_{c1} V_t / E_1 \quad (11)$$

Si llamamos H_d al tiempo de llenado (holding Time)

$$H_d = V_t / Q_t \quad (12)$$

La ecuación (11-6-3-2-1) debe ser escrita de la forma:

$$t_1 = H_d (F_{ca1} + F_{c1} / X_{e1}) \quad (13)$$

Del mismo modo, el tiempo de residencia del jugo extraído de la cámara (2) (E_2) es:

$$t_2 = V_{ca2} / Q_t + V_{ca2} / Q_t - Q_1 + V_{c2} / E_2 \quad (14)$$

Que expresado en función de X_{ei} y F_i viene dado por:

$$t_2 = H_d [F_{ca1} + F_{ca2} / (1 - X_{e1}) + F_{c2} / X_{e2}] \quad (15)$$

Del mismo modo se puede demostrar que para la cámara 3

$$t_3 = H_d [F_{ca1} + F_{ca2} / (1 - X_{e1}) + F_{ca3} / (1 - X_{e1} - X_{e2}) + F_{c3} / X_{e3}] \quad (16)$$

El tiempo de residencia de la cachaza extraída de la última cámara es:

$$\text{cach} = H_d [F_{ca1} + f_{ca3}/1 - X_{e1} - X_{e2} + F_{cach}/1 - X_{e1} - X_{e2} - X_{e3}] \quad (17)$$

Las ecuaciones (13, 15, 16, 17 – 2.2.1.1) permiten calcular los tiempos de residencia en cada uno de los compartimientos y el tiempo promedio de residencia del jugo claro será:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (4-1.3.3.1)$$

En general para un clarificador de n bandejas, el tiempo de residencia de cada extracción de jugo puede expresarse por:

$$i = H_d [F_{ca1} + \sum_{i=2}^n F_{cai} / 1 - \sum_{j=2}^{n-1} X_j + F_{ci} / X_{ei}] \quad (2-1.3.3.1)$$

Modelo II (Fig. 1)

En este modelo de flujo, se desprecia el tiempo de residencia en los conductos auxiliares y solo se tienen en cuenta el volumen ocupado por el jugo y por la cachaza.

Usando las mismas suposiciones que en el Modelo I

$$V_1 = V_{c1} / Q_t \quad (18)$$

Que expresado en función de la fracción de volumen es:

$$V_1 = H_d \cdot F_{c1} \quad (19)$$

Para la cámara 2:

$$V_2 = 0_1 + V_{c2} / Q_t - E_1 \quad (20)$$

Que expresado en función de F_{c1} y X_{e1} se obtiene que:

$$V_2 = H_d [F_{c1} + F_{c2} / 1 - X_{e1}] \quad (21) \quad \text{Para la cámara 3 se obtiene que:}$$

$$V_3 = 0_1 + V_2 + V_{c3} / Q_t - E_1 - E_2 \quad (22)$$

$$V_3 = H_d [F_{c1} + F_{c2} / 1 - X_{e1} + F_{c3} / 1 - X_{e1} - X_{e2}] \quad (23) \quad \text{En general "}$$

$$V_n = H_d [F_{c1} + \sum_{i=2}^n F_{ci} / 1 - \sum_{j=1}^{n-1} E_j] \quad (2 - 1.3.3.1)$$

El tiempo de residencia de la cachaza será para tres compartimientos:

$$\text{cach} = H_d [F_{c1} + F_{c2} / 1 - X_{e1} + F_{c3} / 1 - X_{e1} - X_{e2} + F_{cach} / 1 - X_{e1} - X_{e2} - X_{e3}] \quad (3 - 1.3.3.1)$$

2.2.1.2. Clarificadores de alimentación periférica.

Para desarrollar el modelo matemático en clarificador de alimentación periférica se tuvieron en cuenta las consideraciones que se plantearon anteriormente en equipos de alimentación central, siendo el modelo de flujo el que se muestra en la figura 2.

Realizando un balance de flujo volumétrico se tiene que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = E_1 + E_2 + E_3 + Q_{cach} \quad (5-1.3.3.2)$$

Para este caso se sabe que $Q_1 = Q_2 = Q_3$ y $E_1 = E_2 = E_3$ por tanto: $Q_t = 3Q_1$ (1)

De acuerdo con la ecuación (6-1.3.3.2), la fracción de flujo de alimentación en la cámara i será: $X_i = Q_i / Q_t$ (2)

Teniendo en cuenta que la alimentación a cada bandeja es igual y que el flujo de extracción de cada bandeja son iguales, entonces la ecuación (2-2.2.1.2) será:

$$X_1 = X_2 = X_3 = 1/3$$

$$X_{e1} = X_{e2} = X_{e3}$$

De acuerdo con lo antes planteado, el flujo que sale de cada bandeja será:

$$Q_{c1} = Q_{c2} = Q_{c3} = Q_c = Q_1 - E_1 \quad (3)$$

Además el flujo que pasa a través de cada cámara de distribución viene dado por:

$$Q_{ca1} = Q_c \quad (4)$$

$$Q_{ca2} = Q_c + Q_{ca1} = 2Q_c \quad (5)$$

$$Q_{ca3} = Q_c + Q_{ca2} = 3Q_c \quad (6)$$

El tiempo de residencia del jugo extraído de la primera bandeja será:

$$t_1 = V_{ci} / Q_1 \quad (7-1.3.3.2)$$

Para la cachaza se tiene en cuenta la contribución del tiempo de residencia en la bandeja 1 y el tiempo que tendrá la misma en la primera cámara de distribución quedando definida como:

$$c_1 = t_1 + V_{ca1}/q_{ca1} \quad (7)$$

De la misma manera, el tiempo de residencia del jugo claro en la bandeja 2 será:

$$t_2 = V_{c2} / Q_{c2} \quad (9-1.3.3.2)$$

En el caso de la cachaza el tiempo de residencia quedará definido por la fracción de flujo de cachaza que sale de la bandeja y cámara de distribución 2 por el tiempo t_2 , otra fracción de flujo de cachaza siendo esta el flujo que sale de la bandeja 1 y de la cámara de distribución 2 por el tiempo que tendrá en la cámara de distribución 1 (c_1) y el tiempo que tendrá en la cámara de distribución 2, obteniéndose lo siguiente:

$$c_2 = (Q_{c2} / Q_{ca2}) * t_2 + (Q_{ca1} / Q_{ca2}) * c_1 + V_{ca2} / Q_{ca2} \quad (10-1.3.3.2)$$

Del mismo modo se puede demostrar que para la cámara 3 el tiempo de residencia será para el jugo claro y la cachaza los siguientes:

$$t_3 = V_{c3} / Q_3 \quad (12 - 1.3.3.2)$$

$$c_3 = (Q_{ca2} / Q_{ca3}) * c_2 + (Q_{c3} / Q_{ca3}) * t_3 + V_{ca3} / Q_{ca3} \quad (13 - 1.3.3.2)$$

El tiempo de residencia de la cachaza extraída de la última cámara será:

$$t_{cach} = (Q_{ca2} / Q_{c1+Q_{c2}+Q_{c3}}) * c_2 + (Q_{ca3} / Q_{c1+Q_{c2}+Q_{c3}}) * c_3 + V_{ca3} / Q_{ca3} + V_{cach} / Q_{cach} \quad (16 - 1.3.3.2)$$

Sabiendo que $Q_{c1} = Q_{c2} = Q_{c3} = Q_{cach} / 3$ las ecuaciones (7-1.2.1.1), (10-1.3.3.2), (13-1.3.3.2) y (16-1.3.3.2)

Se puede escribir de la siguiente forma:

$$c_1 = t_1 + 3V_{ca1} / Q_c \quad (21 - 1.3.3.2)$$

$$c_2 = 0.502 + 0.5 c_1 + 3v_{ca2} / 2Q_c \quad (22 - 1.3.3.2)$$

$$c_3 = \frac{2}{3} c_2 + \frac{1}{3} t_3 + V_{cach} / 3Q_c \quad (23 - 1.3.3.2)$$

$$t_{cach} = \frac{2}{3} c_2 + \frac{1}{3} t_3 + V_{ca3} / 3Q_c + V_{cach} / Q_{cach} \quad (24 - 1.3.3.2)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (6-1.3.3.2), (5-1.2.1.1), (6-1.2.1.1) y (12-1.2.1.1) las ecuaciones del tiempo de residencia en este modelo pueden ser escritas en función del tiempo de llenado, de la fracción volumen y fracción de flujo. Para la bandeja (1) se tiene que:

$$t_1 = V_{c1} / Q_1 \quad "Vt / Vt \quad "Qt / Qt = (F_{c1} / X_1) \quad "Hd = 3FC_1Hd \quad (31-1.3.3.2)$$

$$c_1 = 3FC_1Hd + 3Hd * F_{ca1} / X_c$$

$$c_1 = 3Hd [F_{c1} + F_{ca1} / X_c] \quad (32-1.3.3.2)$$

Del mismo modo la bandeja 2:

$$t_2 = 3 FC_2Hd \quad (33-1.3.3.2)$$

$$c_2 = 1.5FC_2Hd + 1.5Hd [F_{c1} + F_{ca1} / X_c] + 1.5 (F_{ca2} / X_c) Hd$$

$$c_2 = 1,5Hd [F_{c1} + F_{c2} + F_{ca1} / X_c + F_{ca2} / X_c] \quad (34-1.3.3.2)$$

Para la bandeja 3 se tiene que: $t_3 = 3FC_3Hd$ (35-1.3.3.2)

$$c_3 = Hd [F_{c1} + F_{c2} + F_{ca1} / X_c + F_{ca2} / X_c] + FC_3Hd + (F_{ca3} / 3X_c) Hd$$

$$c_3 = Hd [F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + F_{ca1} / X_c + F_{ca2} / X_c + F_{ca3} / 3X_c] \quad (36-1.3.3.2)$$

Para la cachaza que sale de la última cámara, la ecuación tomaría la siguiente forma:

$$t_{cach} = Hd [F_{c1} + F_{c2} + F_{ca1} / X_c + F_{ca2} / X_c] + FC_3 Hd + (F_{ca3} / 3X_c) Hd + (F_{cach} / X_{cach}) Hd$$

$$t_{cach} = Hd [F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} + (F_{ca1} / X_c) + F_{ca2} / X_c + F_{ca3} / 3X_c + F_{cach} / X_{cach}] \quad (37 - 1.3.3.2)$$

Para el cálculo de la fracción de flujo que sale de cada bandeja se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$X_c = Q_c / Q_{cach} = Q_{cach} / Q_t \quad (8)$$

Suponiendo que todas las bandejas del clarificador tienen igual volumen e inclinación, el volumen del conducto central de la bandeja se puede calcular mediante la siguiente ecuación según la figura 13.

$$V_{ca} = L * A * h = 3.040 * 1.100 * 1,200 = 4.01 \text{ m}^3 \quad (9)$$

De acuerdo con lo antes planteado y como el clarificador tiene 3 bandejas entonces el volumen total del conducto central será: $V_{ca} = 4.01 * 3 = 12 \text{ m}^3$

2.2.2. Cálculo del tiempo de residencia en el clarificador³:

Con vista a estudiar de forma comparativa el tiempo de residencia en clarificadores de alimentación central y los de alimentación periférica, supondremos dos clarificadores idénticos con las características del clarificador de la UEB. Central Azucarero “América Libre”, pero que difiere únicamente en el tipo de alimentación. De acuerdo con esto, durante el desarrollo de este trabajo se obtuvieron algunos datos los cuales se muestran a continuación:

$$QT = 101 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$Vt = 291 \text{ m}^3$$

Como se explicó anteriormente, el flujo de cachaza se determinó experimentalmente mediante mediciones directas tardándose en llenar el recipiente que almacena la cachaza 19 minutos, que serían 0.32 h, teniendo esta una capacidad de 8.36 m^3 , siendo el flujo de cachaza de: $Q_{cach} = 8.36 / 0.32 = 26.13 \text{ m}^3 / \text{h}$.

El flujo de jugo claro total extraído fue determinado mediante un balance de flujo volumétrico, el cual es:

$$QT = Et + Q_{cach} \quad (5-1.3.3.2)$$

$$Et = QT - Q_{cach}$$

$$Et = 101 - 26.13 = 74.87 \text{ m}^3 / \text{h}.$$

$$Ei = Et/3 = 74.87/3 = 24.96 \text{ m}^3 / \text{h}.$$

Teniendo en cuenta que el clarificador fue modificado disminuyéndole el número de bandejas a 3, a la capacidad volumétrica total. (Vt) en estas condiciones será igual a 76884.40 galones (291 m^3) y con la ecuación (12-2.2.1.1) el tiempo de llenado o Holding Time será:

$$Hd = 291 \text{ m}^3 / 101 \text{ m}^3 / \text{h} = 2.88 \text{ hr}$$

De acuerdo con la ecuación (9-2.2.1.2) se puede calcular el volumen del centro de cada bandeja del clarificador el cual es de 12 m^3 en total.

Para el cálculo de la fracción de jugo extraído y la fracción volumen tanto de la bandeja como del tubo central se utilizaron las expresiones (6-1.3.3.2), (5-2.2.1.1) y (6-2.2.1.1) sabiendo además que las bandejas tienen igual volumen, obteniéndose los siguientes resultados: $E_1 = E_2 = E_3 = 24,96 \text{ m}^3 / \text{h}$.

$Xe_1 = Xe_2 = Xe_3 = Ei / Qt = 24.96 / 101 = 0.2471 * 3 = 0.7413$ fracción de jugo claro extraído total. (6-1.3.3.2)

$$Fc_1 = Fc_2 = Fc_3 = Vc / Vt = 80.22 / 291 = 0.2757 \quad (5-1.2.1)$$

$$Fca_1 = Fca_2 = Fca_3 = Vca / Vt = 4.00 / 291 = 0.0137 \quad (6-1.2.1)$$

Según la ecuación (9-2.2.1.1). F_{cach} será:

$$3(0.2757) + 3(0.0137) = 1 - F_{cach}$$

$$F_{cach} = 0.1318$$

Para el cálculo del tiempo de residencia mediante el modelo 1, se utilizaron las expresiones correspondientes, con las cuales los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Para el cálculo del tiempo de residencia para clarificación con alimentación central se utilizaron la E_c (2-1.3.3.1) para el jugo claro y E_c (3-1.3.3.1) para la cachaza:

$$t_1 = 2.88 [0.0137 + (0.2757 / 0.2471)] = 3.25 \text{ hr}$$

$$t_2 = 2.88 [0.0137 + (0.0137 / (1-0.2471)) + (0.2757 / 0.2471)] = 3.30 \text{ hr}$$

$$t_3 = 2.88 [0.0137 + (0.0137 / (1-0.2471)) + (0.0137 / (1-0.4942)) + (0.2757 / 0.2471)] = 3.38 \text{ hr}$$

$$\text{medio jugo claro} = 3.25 + 3.30 + 3.38 / 3 = 3.31 \text{ hr}$$

Por E_c (9-1.2.1)

$$3(0.2757) + 3(0.0137) = 1 - F_{cachaza}$$

$$\text{cachaza} = 2.88 [(0.0137) + (0.0137 / (1-0.2471)) + (0.0137 / (1-0.4942)) + (0.0137 / (1-0.7413)) + (0.1318 / 0.7413)]$$

$$\text{cachaza} = 1.79 \text{ hr}$$

³ López Figueredo, Eloy, “Tecnología para la Compactación del proceso”, en Cuba Azúcar. Enero -Marzo. No. 1 Vol. XXIX. 2000.

medio de todas las corrientes = $0.7413 (3.31) + 0.2613 (1.79) = \underline{2.92 \text{ hr}}$

Para el cálculo del tiempo de residencia suponiendo alimentación periférica, Se utilizó Ec (39 – 1.3.3.2) para jugo claro y Ec (40 – 1.3.3.2) para cachaza.

$$= 3 (2.88) (0.2757) = 2.38 \text{ hr}$$

$$\text{cachaza} = 3 (2.88) [0.2757 + [0.0137 + (0.1318 / 3) / 0.2587]$$

$$\text{cachaza} = 4.30 \text{ hr}$$

Tiempo medio de residencia de todas las corrientes:

$$\text{medio} = 3.01 \text{ hr}$$

Cálculo del valor económico del azúcar que se pierde teniendo en cuenta un tiempo de retención de 2.92h, que fue el que se obtuvo utilizando el modelo matemático con alimentación central, que es nuestro caso.

Las pérdidas de azúcar por inversión se calculan por Ec – 2 de la siguiente forma:

$$P = (219818 - 6883 \times 102 + 54.6 \times 102^2) \times e^{214.83} \quad (2 - 1.2)$$

$$P = 0.0017 \% / \text{h.}$$

3.1.3 El valor económico de este azúcar que se pierde con 2.88 hrs sería:

$$13.35 \times 2575.92 \times 0.0017 \times 2.88$$

$$AR = \frac{\text{---}}{\text{---}} = 0.00083\% \quad (3 - 1.2)$$

$$0.96 \times 2112.04 \times 100$$

$$AZ = 0.00083 \times 2112.04 = 1.75 \text{ TM} / \text{día} \quad (15 - 2.3)$$

$$AZ \times TDZ \times \$/\text{TM} \text{ Azúcar} = 1.75 \times 15 \times 1327.35 = \$ 34842.94 \text{ en 15 días de zafra.}$$

Las pérdidas económicas que tenemos cuando se excede el tiempo de residencia del jugo y la cachaza dentro del clarificador, causando pérdidas por inversión que se determinan como azúcar recuperable serían de **\$ 34842.94** en 15 días de operación de la fábrica.

3.1.4. El valor económico de este azúcar que se pierde 2.92 hrs sería:

$$13.35 \times 2575.92 \times 0.0017 \times 2.92$$

$$AR = \frac{\text{---}}{\text{---}} = 0.00083\% \quad (3 - 1.2)$$

$$0.96 \times 2112.04 \times 100$$

$$AZ = 0.00083 \times 2112.04 = 1.77 \text{ TM} / \text{día} \quad (15 - 2.3)$$

$$AZ \times TDZ \times \$/\text{TM} \text{ Azúcar} = 1.77 \times 15 \times 1327.35 = \$ 35241.14 \text{ en 15 días de zafra.}$$

Las pérdidas económicas que tenemos cuando se excede el tiempo de residencia del jugo y la cachaza dentro del clarificador, causando pérdidas por inversión que se determinan como azúcar recuperable serían de **\$ 35241.14** en 15 días de operación de la fábrica.

La diferencia que ocasiona utilizar un modelo matemático para el cálculo del tiempo de residencia del jugo claro y la cachaza dentro del clarificador es de **\$398.20** en 15 días de operación, que se pierden por inversión de la sacarosa dentro del clarificador, que dejan de cuantificarse cuando utilizamos el método del tiempo de llenado.

2.2. Cálculo del tiempo de residencia teniendo en cuenta la inversión realizada en el montaje de un clarificador de bajo tiempo de residencia (BTR)⁴: Ver fig. 1 del Anexo

$$TR = \text{GALC} / \text{GalJA} \quad (13 - 1.2)$$

$$\text{GALJA} = \text{JA} * 1000 / 24 * \text{PJÁ} \quad (14-1.2)$$

$$\text{GALJA} = 2575.92 \times 1000 / 24 \times 4.026 = 26659.22 \text{ gal.} / \text{h} = 100.92 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

$$\text{QJA} = 101 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

Volumen real del clarificador DTC-Oriente modificado a Guardián:

$$VR = 147.632 - 0.270 = 147.362 \text{ m}^3 = 39000 \text{ gal}$$

⁴ Moundú, Rubén y José C. Bango. “Tiempo de Residencia en los clarificadores: Un Enfoque económico”, en Cuba Azúcar, Abril – Junio. No 2. Vol. XXVII. 1998. Pérez María del C. y Jorge Monteverde “Clarificador de Bajo Tiempo de Retención”, en Cuba Azúcar. Enero – Marzo. No. 1. Vol. XXVII. 1998.

$$TR = 147.362 / 101 = 1.47 \text{ h} \quad (1-1.2)$$

Donde: Precio de la TM de azúcar) \$1327.35

Las pérdidas de azúcar por inversión se calculan por Ec - 2 de la siguiente forma:

$$P = (219818 - 6883 \times 102 + 54.6 \times 102^2) \times e^{-214.83} \quad (2 - 1.2)$$

$$P = 0.0017 \% / \text{h.}$$

El valor económico de este azúcar que se pierde sería:

$$AR = 13.35 \times 2575.92 \times 0.0017 \times 1.47 / 0.96 \times 2112.04 \times 100 = 0.00042\% \quad (3 - 1.2)$$

$$AZ = 0.00042 \times 2112.04 = 0.89 \text{ TM} / \text{día} \quad (15 - 1.3)$$

AZ x TDZ x \$/TM Azúcar = 0.89 x 15 x 1327.35 = \$ 17720.12 en 15 días de zafra. Como se observa, con la inversión del CBTR se recuperan \$17720.13 con relación a las pérdidas que nos ocasiona el Guardián en 15 días de zafra.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

Los modelos desarrollados permiten determinar los tiempos de residencia de una forma mas exacta que en la actualidad. Obsérvese como en ambos métodos suponiendo diferentes tipos de alimentación pero con las mismas características volumétricas y con un tiempo de llenado igual a 2.88 hrs., se observa como los tiempos de residencia para los jugos claros es de 3.31 hrs. cuando se utiliza alimentación central, y 2.38 hrs. cuando se utiliza alimentación periférica, lo cual nos indica que los clarificadores con alimentación periférica son más efectivo, ya que la extracción de jugos claros se realiza con un tiempo de residencia menor que el tiempo de llenado. Pero por otro lado podemos observar que el tiempo de residencia de la cachaza es 1.79 hrs. para el caso de la alimentación central y 4.30 hrs. para el caso de la alimentación periférica, lo cual indica en el caso del tiempo de residencia de la cachaza el clarificador con alimentación central es mas efectivo, por lo que podemos decir que sería conveniente la utilización de clarificadores con alimentación central, ya que al tener la cachaza retenida en el clarificador, o sea con un mayor tiempo de residencia, esto provocaría afectaciones al jugo y favorece a la formación de sustancias no agradables para el proceso que darían lugar en gran medida a la acidez de los jugos y por tanto pérdida para el proceso por la inversión de sacarosa. Podemos destacar también que con la utilización de este modelo matemático se ha demostrado que es importante calcular los tiempos de residencia de los jugos en los clarificadores mediante este método, ya que utilizando los métodos antiguos como es el de flujo contra capacidad volumétrica, que lo que nos da es realmente el tiempo de llenado, y no nos dice que tiempo de residencia tengo por bandejas, ni mucho menos el tiempo de residencia de la cachaza, que es lo que realmente necesito para hacer una evaluación real de los tiempos de residencia en clarificadores. Como hemos podido demostrar en los cálculos realizados anteriormente, podemos ver que calculando el tiempo de residencia de los jugos en el clarificador, teniendo en cuenta el tiempo de llenado únicamente y el volumen del clarificador, no nos da un valor real ya que no tiene en cuenta la extracción de jugo por bandejas, ni la extracción de cachaza, por lo que al realizar los cálculos utilizando el modelo matemático que si tiene en cuenta estas extracciones se obtiene una diferencia en dinero de \$398.20 por cada 15 días de zafra. Es importante destacar como resultado de este trabajo que la modificación realizada al DTC – Oriente al tipo guardián no ha cumplido con las especificaciones establecidas ya que los tiempos de residencias alcanzados no dan respuestas a los índices establecidos en la literatura para clarificadores de bajo tiempo de residencia según (7) debe ser de 20000 gal/100000 @ de caña molida, este clarificador modificado de acuerdo a nuestra molida que es de 240000 @/día (2760 Ton), debía tener un índice de capacidad de 48000 gal, teniendo un índice de 77 000 gal, por eso el tiempo de residencia está por encima del especificado en la literatura, y por lo tanto no es eficiente, provocando inclusive en condiciones normales de operación pérdidas de sacarosa.

En la evaluación realizada al CBTR podemos observar como disminuye considerablemente el tiempo de residencia del jugo a 1.47 hrs, lo que demuestra la eficiencia con que trabaja esta tecnología, o sea 1.45 hrs menos que clarificadores multibandejas modificados a Guardián que son clarificadores de bajo tiempo de residencia por su diseño, obteniendo una diferencia económica de \$17521.02 menos de pérdidas por este concepto..

CONCLUSIONES:

- 1- El clarificador modificado a guardián, no cumple con los índices de capacidad establecidos de acuerdo a la bibliografía estudiada, que es el sistema llevado a cabo en nuestra Industria al modificar el DTC – Oriente a Guardián.
- 2- Como resultado de la utilización de un modelo matemático para calcular los tiempos de residencia de jugos claros y la cachaza, hemos podido demostrar que las evaluaciones realizadas teniendo en cuenta el método de tiempo de llenado para calcular el tiempo de residencia del jugo dentro del clarificador, no nos da valores reales, obteniendo resultados económicos que difieren en \$398.20 en 15 días de operación de la fábrica, es dinero que se deja de tener en cuenta para la evaluación económica, ya sea para la inversión u otro tipo de análisis que se quiera realizar.
- 3- Como resultado de la inversión realizada, en el cambio de tecnología del clarificador Guardián a CBTR hemos podido demostrar a partir del tiempo de residencia obtenido que los resultados económicos en este tipo de tecnología son superiores ya que se logra tiempos de residencia del jugo y la cachaza de 1.47 hrs., inferior en 1.45 hrs. con respecto a los clarificadores multibandejas, recuperando por este concepto \$ 17521.02.
- 4- El tiempo de residencia de los jugos claros en un clarificador con alimentación periférica, puede calcularse a partir de las ecuaciones (7), (9) y (12), para el caso en que los compartimientos son iguales puede utilizarse la ecuación (39) generalizada para n bandejas:

$$= (N) (F) (Hd)$$

- 5- El tiempo de residencia de la cachaza puede ser determinado por la expresión (37). Para el caso en que los compartimientos son iguales puede utilizarse la ecuación (40) generalizada para n bandejas:

$$= N (Hd) [[Fc + [Fca + (Fcachaza / N) / Xcachaza]]]$$

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

1. Spencer Meade. Manual del Azúcar de Caña.
2. Honig, Peter." Principio de Tecnología Azucarera ". T I. Edición Revolucionaria. Guantánamo, 1987.
3. Pedrosa puertas, R. Fabricación de Azúcar crudo de Caña. Ed. Científico- Técnica. La Habana, 1975.
4. Manual de operaciones de la industria azucarera Tomo I y II.
5. Ing. Emilio P Días Garcías. CAI "Manuel Martínez Prieto. Ciudad de La Habana. Julio 1996. Nuevo Bloque Tecnológico para la Purificación del Guarapo.
6. Monduí, Rubén y José C. Bango. Tiempo de Residencia en los Clarificadores: Un enfoque Económico, en Cuba Azúcar. Abril – Junio. No.2.Vol. .XXXVII.1998.
7. Pérez, María del C. y Jorge Monteverde. Clarificador de bajo tiempo de Retención, en Cuba Azúcar. Enero – Marzo. No.1.Vol. XXVII.1998.
8. López Figueredo, Eloy. Tecnología para la Compactación del Proceso, en Cuba Azúcar. Enero – Marzo. No.1. Vol. .XXIX. 2000.

NOMENCLATURA:

| | |
|--------|--|
| a | Kilogramos de CaO por TM de caña molida (kg/TM) |
| AR | Afectación al rendimiento (%) |
| AZ | Azúcar perdida o recuperada (TM/día) |
| C | Caña molida por día (TM/día) |
| CBTR | Clarificador de bajo tiempo de retención |
| e | Gramos de CaO por litro de lechada de cal (g/l) |
| GalC | Galones del clarificador (gal) |
| GalJA | Galones de jugo alcalizado procesados en una hora (gal/h) |
| JA | Cantidad de jugo alcalizado (TM/día) |
| JF | Cantidad de jugo del filtro (TM/día) |
| JMZ | Cantidad de jugo mezclado. (TM/día) |
| k | Peso en gramos de un litro de lechada de cal (g/l) |
| Lch | Cantidad de lechada de cal. (TM/día) |
| P | Perdidas por inversión (%/h) |
| pHjA | Valor de pH del jugo alcalizado |
| PZcar | Pureza de la cal (%) |
| RPC | Rendimiento potencial de la caña |
| TCM | Tonelada de caña molida |
| Bxjp | Brix del jugo primario |
| Bxjm | Brix del jugo mezclado |
| %Ext | Porcentaje de extracción en los molinos |
| T ja | Temperatura del jugo alcalizado (C) |
| TDZ | Total de días de zafra (días) |
| TM | Toneladas métricas |
| TR | Tiempo de residencia o retención del jugo en el clarificador (h) |
| %PolJA | Porcentaje en Pol del jugo alcalizado (%) |
| %PolJF | Porcentaje en Pol del jugo del filtro (%) |
| %PolJM | Porcentaje en Pol del jugo mezclado (%) |
| PJA | Densidad del jugo alcalizado (kg/gal) |
| Ej | Flujo de jugo extraído en la bandeja i (m ³ /h) |
| Fcai | Fracción volumen de la cámara de distribución i |
| Fci | Fracción volumen de la cámara principal i |
| Hd | Tiempo de llenado (hr) |
| N | Numero de bandejas |
| Qcach | Flujo volumétrico de cachaza (m ³ /hr) |
| Qcai | Flujo de cachaza que sale de la cámara de distribución 1 |
| Qci | Flujo de cachaza que sale de la bandeja i (m ³ / hr) |
| Qi | Flujo alimentado a la bandeja i (m ³ / hr) |
| QT | Flujo volumétrico total (m ³ /hr) |
| Vcai | Volumen de la cámara de distribución i (m ³) |
| Vci | Volumen de la cámara principal i (m ³) |
| VT | Volumen Total (m ³) |
| Xei | Fracción de flujo extraído en la bandeja i |
| Xi | Fracción de jugo extraído en la bandeja i |
| 0cach | Tiempo de resistencia de la cachaza (hr) |
| Oi | Tiempo de resistencia del jugo claro en la bandeja i |

ANEXOS:

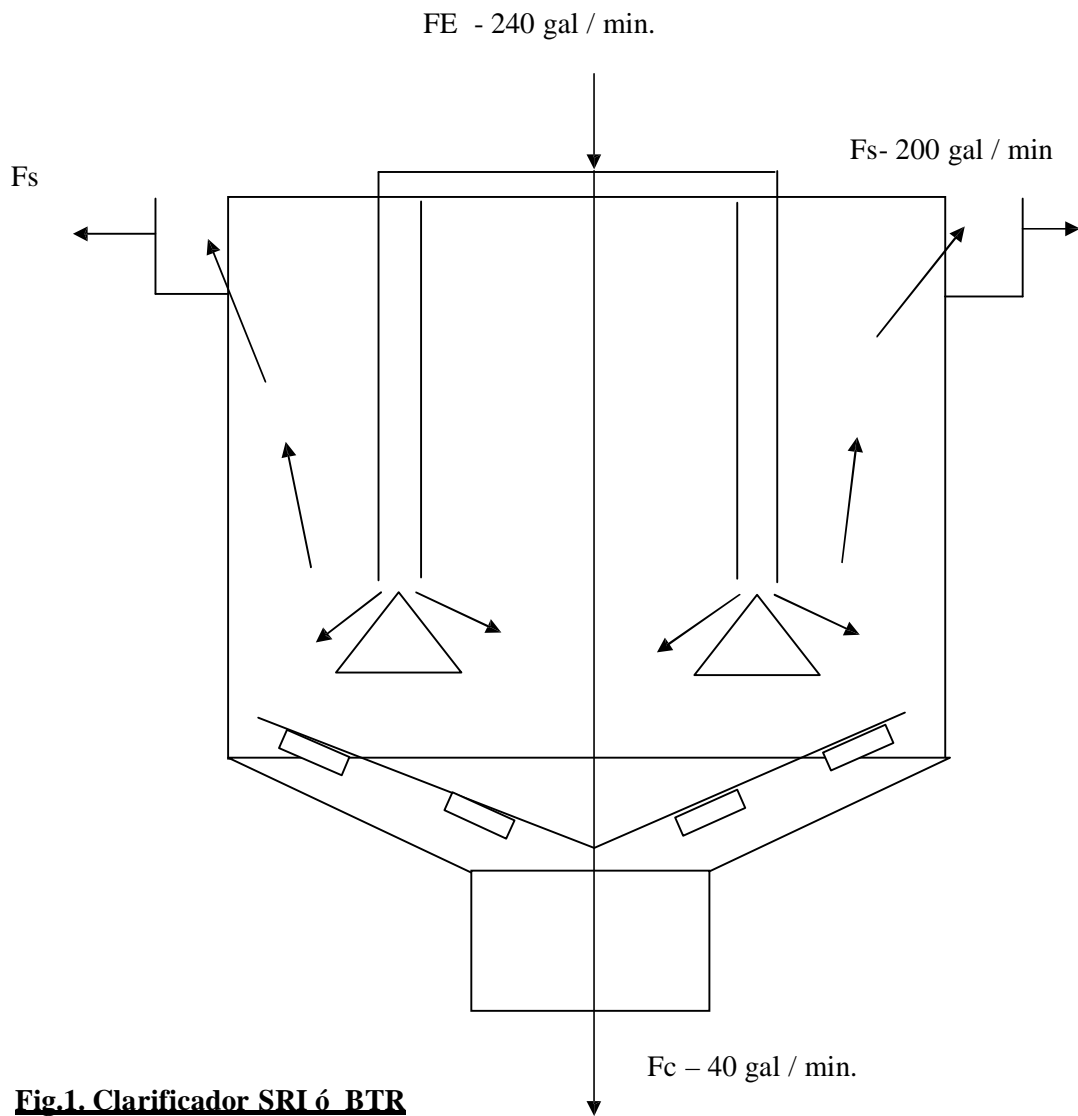


Fig.1. Clarificador SRI ó BTR
vista
frontal Seccionada.

TABLA 1
DATOS OBTENIDOS EN LAS EVALUACIONES EXPERIMENTALES LUEGO DE REALIZARSE VARIAS CORRIDAS:

| No. | Bx Jp | Bx JM | BX JA | BX bagazo | Humedad bagazo | % fibra bagazo | % fibra caña | % Pol JM | % pol JA | % pol JF | % pol bagazo | Pza Cal | Bé Lcal | Pza ultimo Jugo Ext. | Tiem JA |
|-----|-------|-------|-------|-----------|----------------|----------------|--------------|----------|----------|----------|--------------|---------|---------|----------------------|---------|
| 1 | 20.79 | 14.84 | 15.69 | 2.33 | 49.50 | 48.17 | 17.36 | 13.15 | 12.00 | 12.03 | 1.66 | 52.72 | 3.8 | 71.11 | 103 |
| 2 | 22.77 | 15.33 | 15.62 | 2.19 | 49.55 | 48.26 | 16.61 | 13.86 | 13.00 | 11.63 | 1.57 | - | 3.8 | 71.83 | 100 |
| 3 | 22.50 | 15.97 | 16.49 | 2.24 | 49.75 | 48.01 | 16.39 | 14.38 | 14.10 | 12.37 | 1.51 | - | 3.7 | 67.27 | 103 |
| 4 | 22.32 | 15.78 | 16.04 | 2.46 | 49.44 | 48.10 | 16.06 | 14.10 | 13.70 | 11.53 | 1.69 | 56.04 | 3.9 | 68.70 | 102 |
| 5 | 22.50 | 16.00 | 16.91 | 2.45 | 49.67 | 47.88 | 17.66 | 14.48 | 12.93 | 12.47 | 1.77 | 62.36 | 3.8 | 72.17 | 103 |
| 6 | 23.16 | 15.80 | 16.24 | 2.30 | 49.57 | 48.13 | 16.79 | 14.05 | 12.10 | 10.30 | 1.57 | - | 3.0 | 68.41 | 103 |
| 7 | 22.25 | 14.84 | 16.57 | 2.34 | 50.00 | 47.66 | 17.04 | 14.00 | 13.50 | 11.27 | 1.63 | 59.15 | 2.2 | 69.69 | 103 |
| 8 | 22.85 | 15.47 | 16.40 | 2.44 | 49.86 | 47.70 | 17.26 | 13.90 | 13.25 | 11.80 | 1.73 | 46.72 | 3.3 | 70.82 | 103 |
| 9 | 22.71 | 15.58 | 16.58 | 2.51 | 50.00 | 47.49 | 17.66 | 14.13 | 13.02 | 12.70 | 1.86 | 57.11 | 3.4 | 73.97 | 103 |
| 10 | 22.78 | 14.95 | 16.05 | 2.28 | 49.75 | 47.97 | 17.69 | 13.96 | 13.60 | 11.43 | 1.69 | - | 3.0 | 74.04 | 101 |
| 11 | 22.70 | 16.18 | 15.70 | 2.21 | 49.38 | 48.41 | 16.89 | 14.70 | 12.90 | 11.87 | 1.62 | 69.43 | 3.6 | 73.37 | 103 |
| 12 | 22.41 | 15.08 | 15.49 | 2.49 | 49.33 | 48.18 | 16.11 | 13.93 | 13.33 | 12.43 | 1.71 | 66.97 | 3.0 | 68.60 | 103 |
| 13 | 22.59 | 16.18 | 16.42 | 2.53 | 49.40 | 46.07 | 16.29 | 14.38 | 14.05 | 11.80 | 1.75 | 62.58 | 2.5 | 69.04 | 96 |
| 14 | 22.43 | 15.49 | 16.42 | 2.36 | 49.60 | 48.04 | 16.94 | 13.92 | 14.02 | 11.65 | 1.63 | 50.15 | 3.0 | 69.01 | 103 |
| 15 | 21.97 | 15.24 | 17.27 | 2.27 | 49.00 | 48.73 | 17.36 | 13.96 | 13.70 | 12.35 | 1.68 | - | 3.1 | 73.97 | 102 |
| 16 | 22.45 | 15.51 | 16.26 | 2.35 | 49.59 | 48.05 | 16.94 | 14.06 | 13.35 | 11.84 | 1.67 | 58.32 | 3.3 | 70.80 | 102 |