

**Universidad de Matanzas
Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico

“Desarrollo de un sistema de control para establecer el flujo de agua de lavado adecuado en la operación de filtración del proceso de fabricación de azúcar crudo”

Autor:

José Carlos Rodríguez Samá

Tutor:

Ing. Jonathan Serrano Febles

DrC. Mario Yll Lavín

Tutor consultante:

DrC. Jesús Luis Orozco

Matanzas, 2020

Pensamiento:

“Optaría de nuevo por la ingeniería química debido a la diversidad de temas que esta carrera abarca”

R. B. Bird.

Declaración de Autoridad

Yo, José Carlos Rodríguez Samá, declaro ser el único autor de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición de la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo a que sea utilizado con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

José Carlos Rodríguez Samá

Agradecimientos:

A Dios por estar presente en mi vida y ayudarme en los momentos más difíciles.

A mis padres, por su apoyo incondicional, por su sacrificio y amor brindado en cada momento.

A mis tutores por su tiempo brindado, paciencia y por su gran apoyo en todo momento para la realización de esta tesis.

A todos mis familiares y amigos que de una manera u otra me han brindado su apoyo y motivación lo que me ha servido para la culminación de mi carrera.

Resumen:

La presente investigación corresponde al análisis del lavado de la etapa de filtración que tiene como caso base a la estación de filtración del CAI: "Jesús Rabí". En esta se establece la metodología para la obtención de herramientas que permitan un mejor control operacional del agua de lavado de los filtros. Para ello se requiere determinar, en condiciones controladas de experimentación, la influencia de la temperatura del agua de lavado sobre la extracción de sacarosa e impurezas a través de un diseño estadístico de experimentos factorial a tres niveles. Se consideran como factores experimentales a la temperatura del agua de lavado de 50 a 95 °C y la cantidad de agua a emplearse, de tal manera que represente un 30 y 360 % de los lodos de la porción de análisis. A través de ello se persigue demostrar que no resulta beneficioso operar a elevados valores de temperaturas por la inadecuada cantidad de almidones y ceras que se deben extraer, pese a algún beneficio en la recuperación de sacarosa que pueda evidenciarse. Luego se procede a describir el procedimiento para desarrollar modelos matemáticos empíricos que permitan una adecuada dosificación del agua de lavado. Se establece como término independiente para efectuar las correlaciones correspondientes al cociente entre el flujo volumétrico de bagacillo y la cantidad de cachaza que se genera. A través de estos modelos es posible construir gráficos que viabilizan el ajuste adecuado de tal variable operacional y que, consecuentemente, permitan un mejor control de la etapa.

Abstract:

The present investigation corresponds to the analysis of the wash of the filtration stage that has like case bases to the filtration station of the sugarmills: "Jesús Rabí". In this, the methodology settles down for the obtaining of tools that it allow a better operational control of the water of laundry of the filters. For it is required to determine it, under controlled conditions of experimentation, the influence of the temperature of the wash water on the sucrose extraction and impurities through a factorial statistical design of experiments at three levels. They are considered as experimental factors to the temperature of the wash water from 50 to 95 °C and the quantity of water to be used, in such a way that represents a 30 and 360 % of the muds of the analysis portion. Through it is pursued it to demonstrate that it is not beneficial to operate to high values of temperatures for the inadequate quantity of starches and wax that should be extracted, in spite of some benefit in the sucrose recovery that can be evidenced. Then, it proceeds to describe the procedure to develop empiric mathematical models that allow an appropriate dosage of the wash water. In this case, independent term to make the correlations corresponding to the quotient among the volumetric flow of bagacillo and the quantity of cake that it is generated. Through these models, it is possible to build graphics that to make viable the appropriate adjustment of such an operational variable and that, consequently, allow a better control of the stage.

Simbología:

MSR: Metodología de superficie respuesta

DW: Estadígrafo de Durbin-Watson

E_{pol} : Extracción de sacarosa (%)

pol_{JF} : Composición de sacarosa aparente en jugo filtrado (%)

m_{JF} : Masa de jugo filtrado (g)

pol_L : Composición de sacarosa aparente en lodo (%)

m_L : Masa de lodo del análisis (g)

pol_{JT} : Composición de sacarosa aparente en jugo turbio (%)

m_{JT} : Masa de jugo turbio (g)

pol_{JC} : Composición de sacarosa aparente en jugo claro (%)

m_{JC} : Masa de jugo claro (g)

pol_{JC} : Porcentaje de sacarosa aparente en cachaza (%)

m_{JC} : Masa de cachaza (g)

$prza_{JF}$: Pureza del jugo filtrado (%)

Bx_{JF} : Contenido de sólidos disueltos del jugo filtrado (°Bx)

Bx_{JC} : Contenido de sólidos disueltos del jugo claro (°Bx)

Bx_{JT} : Contenido de sólidos disueltos del jugo turbio (°Bx)

I_{pol} : Porcentaje de sacarosa que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

I_{alm} : Porcentaje de almidón que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

alm_{JC} : Concentración de almidón en jugo claro (mg/mL)

V_{JC} : Volumen de jugo claro (mL)

alm_{JT} : Concentración de almidón en jugo turbio (mg/mL)

V_{JT} : Volumen de jugo turbio (mL)

I_{ga} : Porcentaje de gomas acuosolubles que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

ga_{JC} : Composición volumétrica de gomas acuosolubles en jugo claro (%)

V_{JC} : Volumen de jugo claro (mL)

ga_{JT} : Composición volumétrica de gomas acuosolubles en jugo turbio (%)

V_{JT} : Volumen de jugo turbio (mL)

\hat{y} : Variable respuesta predicha

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$: Coeficientes de regresión correspondientes al intercepto, términos lineal, cuadrático y de interacción entre los factores experimentales respectivamente.

X_i, X_j : Variables independientes (factores experimentales)

k : Número de factores experimentales (en este caso dos)

AL : Flujo de agua de lavado (m^3/h)

C : Flujo de cachaza (kg/h)

Hmd_c : Humedad de la cachaza (%)

R_I : Porcentaje de remoción de insolubles (%)

Bx_{JF} : Porcentaje de sólidos solubles en el jugo filtrado (%)

JF : Flujo de jugo filtrado (m^3/h)

I_L : Contenido de insolubles en lodo (%)

I_{JF} : Contenido de insolubles en jugo filtrado (%)

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Revisión bibliográfica | 3 |
| 1.1 Proceso de fabricación de azúcar | 3 |
| 1.2 Filtros al vacío rotatorios de cachaza | 7 |
| 1.3 Operación del proceso de filtración | 10 |
| 1.4 Influencia del almidón en la producción de azúcar crudo | 15 |
| Conclusiones parciales de la revisión bibliográfica: | 17 |
| Capítulo II: Materiales y métodos | 18 |
| 2.1. Etapa de filtración de lodos al vacío | 18 |
| 2.2 Determinación del comportamiento de la extracción de sacarosa e impurezas para diferentes condiciones de lavado | 19 |
| 2.2.1 Consideraciones generales de la experimentación | 19 |
| 2.2.2 Determinación de las variables respuestas | 21 |
| 2.2.3 Planificación del trabajo experimental a través de la MSR | 24 |
| 2.2.4 Desarrollo de la experimentación | 25 |
| 2.2.5 Procesamiento estadístico de los resultados experimentales | 27 |
| 2.3 Modelación del proceso de filtración a nivel industrial | 28 |
| 2.3.1 Ajuste de los modelos matemáticos | 30 |
| 2.4 Aplicabilidad de los modelos matemáticos: construcción de gráficos para el control operacional del agua de lavado | 31 |
| Conclusiones: | 32 |
| Recomendaciones | 33 |
| Bibliografía | 34 |
| Anexos | |

Introducción

En los momentos actuales se destinan grandes recursos para la reanimación de la industria azucarera cubana y su reposicionamiento en el mercado internacional. El azúcar crudo constituye uno de los principales productos exportables del país y una fuente de ingreso de divisas importante. Es por esta razón que constituye todo un imperativo alcanzar un mayor rendimiento y recobrado del proceso productivo, lo que puede lograrse a través de un mejor comportamiento operacional de las etapas que lo constituyen.

La filtración de lodos es altamente compleja, ya que sobre ella repercuten muchos factores asociados a la propia variabilidad del proceso en las condiciones de entrada y al funcionamiento de equipos como el clarificador y las bombas de vacío.

Es común que se verifiquen en la práctica problemas fundamentalmente relacionados con un mal agotamiento de la cachaza y la reincorporación de no azúcares. Esto último supone una sobrecarga al sistema de purificación, afectan el proceso de agotamiento de las mieles y compromete el cumplimiento del producto estrella con las normas internacionales que avalan su comercialización. Elevados valores de pol en cachaza producen grandes pérdidas de sacarosa por este sentido y son resultado de una cantidad de bagacillo o agua de lavado inadecuada. También no es poco frecuente que se produzcan revolturas en el clarificador producto a una alta retención de insolubles en la filtración así como excesivas diluciones del jugo filtrado con graves consecuencias para el balance energético del central azucarero.

Estas y otras limitaciones para el buen desenvolvimiento del proceso productivo son en última instancia, resultado de una incorrecta operación en el área de filtración y efecto de un inadecuado control operacional.

Por tales motivos se tiene el **problema científico** siguiente: ¿cómo mejorar la operación de filtración del proceso de producción de azúcar crudo?

Para darle solución se formula la **hipótesis** siguiente:

Con un adecuado control del agua de lavado se logra una mejor operación de la filtración en el proceso de producción de azúcar crudo

Se tiene como **objetivo general** de la investigación:

Desarrollar un sistema de control para establecer el flujo de agua de lavado adecuado en la operación de filtración

Se tiene como **objetivos específicos**:

1. Determinar el efecto de la temperatura de lavado sobre la extracción de sacarosas e impurezas en la etapa de filtración.
2. Desarrollar modelos matemáticos para una adecuada dosificación del agua de lavado.
3. Obtener gráficos que permitan un mejor control operacional del agua de lavado.

Capítulo 1: Revisión bibliográfica

En este capítulo se recopila información científica sobre el proceso de producción de azúcar crudo con especial detenimiento en la etapa de filtración de lodos al vacío, área de purificación que concierne a esta investigación. Se analiza la repercusión de los principales parámetros de operación de la misma, el uso de agua de lavado como variable manipulable en el control así como los efectos negativos de las impurezas que se incorporan; lo que constituye el basamento teórico de la presente investigación.

1.1 Proceso de fabricación de azúcar

El proceso de fabricación de azúcar crudo consta de las siguientes etapas: extracción o molienda, alcalización, calentamiento, clarificación, evaporación, cristalización y centrifugación (van der Poel, *et al.*, 1998). Según Hugot (1988), el proceso comienza en el pesaje mediante básculas de las unidades que transportan la caña de azúcar, en esta parte se determina la calidad de la materia prima. La caña que llega a la fábrica se descarga sobre las mesas de alimentación, luego se somete a un proceso de preparación que consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de desfibradoras o desmenuzadoras para poder pasar al proceso de extracción del jugo (Ayala, 2015).

El proceso de elaboración de azúcar consiste en separar la sacarosa en su estado más puro del resto de componentes de la caña de azúcar. Para llevar a cabo este proceso se requiere la coordinación en campo y en fábrica de los operadores e ingenieros involucrados para el proceso de extracción de la sacarosa (Martinez, 2019). A continuación, se explica brevemente las principales etapas de este proceso productivo:

- ✓ Etapa de extracción y molienda

Según Morales, *et al.* (2018), la caña preparada se somete al proceso de molienda para extraer el jugo de caña mediante la presión que ejercen los rodillos del tándem de molinos. Del 60 al 70 % del jugo se extrae por la presión que ejerce el primer molino, subsecuente el flujo disminuye y el jugo remanente en el bagazo se extrae por una combinación de lixiviación y presiones periódicas.

Para ello se aplica agua de imbibición; la que debe estar entre 75 y 80 °C, lo cual facilita la extracción y evita el desarrollo microbiano. Sin embargo, Posada (1987) y Rein (2012) recomiendan que la temperatura del agua de imbibición no debe exceder de los 85 °C para evitar que el derretimiento de las ceras de la caña ocasione que patinen las mazas de los molinos.

✓ Etapa de alcalización

El jugo color verde oscuro procedente de los molinos es ácido y turbio, por ello se introduce en la etapa de alcalización; proceso que consiste en agregar hidróxido de calcio al jugo con el objetivo de neutralizar su acidez. Este proceso fundamental es para lograr una clarificación eficiente y evitar la destrucción de azúcares e inversión de la sacarosa. Cuando el pH es menor de 7, la clarificación es deficiente y la pérdida por inversión aumenta; mientras que, cuando el pH es mayor de 8 se produce la destrucción de los azúcares reductores, exceso de incrustaciones en los evaporadores, aumento de producción de mieles, aumento de color, y azúcar de baja calidad (Rein, 2012).

✓ Etapa de Calentamiento

Antes de llegar a la estación de calentamiento, se realiza el proceso de encalado; el jugo extraído de los molinos se envía a un tanque donde se le adiciona cal. Esto se hace necesario para provocar una reacción química entre el óxido de calcio y el ácido fosfórico presente en el jugo, de esta manera se neutraliza la acidez natural del jugo y se forman compuestos que absorben alrededor de sus moléculas las impurezas del jugo a fin de clarificarlo.

Según Pérez (2009) y Morales, *et al.* (2018), la temperatura del jugo alcalizado a la salida de los calentadores está entre 103 y 105 °C con el objetivo de favorecer el proceso de coagulación en la etapa de clarificación. Rein (2012) establece que la temperatura del jugo tiene que ser superior al punto de ebullición, que se comprende entre 102 y 104 °C, ya que por encima de este intervalo de temperatura se produce destrucción de los azúcares, formación de color y caída excesiva del pH.

✓ Etapa de clarificación

En la etapa de clarificación se busca eliminar las impurezas solubles e insolubles presentes en el jugo. Se separa el jugo en dos partes, el jugo clarificado y los precipitados sedimentables, espumas y lodos. Los lodos son el sedimento o precipitado que contiene sales insolubles, fosfatos de calcio, ceras, gomas y sacarosa (Morales, *et al.*, 2018). Según Herrera (2011), la clarificación del jugo tiene como objetivo producir un precipitado de composición compleja que contiene sales insolubles de cal, albúmina coagulada, ceras, grasas y gomas que contiene el jugo de caña, debido a que estas son precursoras de color y turbiedad.

Con la coagulación de las impurezas se desencadenan reacciones químicas que hacen posible las colisiones entre partículas. Estas tienen lugar tras la adición de la cal, la cual reacciona con sustancias cargadas negativamente presentes en el jugo para formar compuestos insolubles o macromoléculas de lodos, que finalmente son las que se extraen para que el jugo quede claro. Las reacciones de precipitación inician con la formación del fosfato monocálcico y dicálcico, según Doherty y Rackemann (2009) y Greenwood, *et al.* (2011). Una vez que las impurezas coagulan, se introduce un proceso de floculación porque permite que estas sedimenten en un menor tiempo posible para poder producir un jugo claro y proseguir con el proceso de elaboración del azúcar.

✓ Etapa de filtración

Para recuperar la sacarosa remanente, el precipitado que se forma en la clarificación se somete a un proceso de filtración, generalmente se emplea filtros rotatorios al vacío; en estos equipos se adiciona bagacillo y agua de lavado a la cachaza para facilitar la filtración. El filtro consiste en un tambor rotatorio cubierto de láminas de metal perforado, que se sumerge en un baño de cachaza. A medida que gira se aplica vacío, se adhiere una torta fina sobre el tambor, que pasa por duchas lavadoras con agua caliente, para obtener una mayor recuperación de sacarosa en el jugo filtrado.

Después de lavada la torta, se seca por la acción del vacío, el cual es retirado posteriormente para poder desprender la torta del tambor mediante raspadores (Herrera, 2011). Para obtener mejor eficiencia en el filtrado es necesario conocer

que los jugos alcalinos filtran mejor que los jugos ácidos o neutros, por esta razón generalmente se agrega cal a la cachaza, antes de enviarlas a la filtración y el pH se establece entre 8 y 8,5.

De la filtración se obtienen dos corrientes; un jugo filtrado de calidad intermedia que se recircula al tanque de alcalizar y un residual que se conoce como torta o cachaza (Hugot, 1988).

✓ Etapa de evaporación

En esta etapa se evapora la mayor cantidad de agua contenida en el jugo claro, de forma tal que se logre su concentración sin llegar a la condición de saturación, para ello se requiere de un preevaporador y un cuádruple efecto (Hugot, 1988). Cardona (2009), plantea que el jugo clarificado se somete a evaporación en un conjunto de evaporadores en serie; donde se elimina gran parte del agua contenida en el jugo (alrededor del 80 %), de lo cual resulta un material denso llamado meladura, según Pérez (2009), la meladura debe tener una concentración próxima a los 65 °Bx.

✓ Etapa de cristalización

En la etapa de cristalización la meladura se envía a los tachos al vacío, donde se introducen núcleos de sacarosa previamente formados, de tamaño homogéneo para lograr un crecimiento de los cristales de azúcar de manera uniforme. Este proceso incluye, equipos que comúnmente se les llaman cristalizadores, donde se intenta lograr el agotamiento de la sacarosa contenida en la miel que acompaña al cristal, formado por enfriamiento (Hugot, 1988). El producto creado después de la formación de los cristales del tamaño y pureza deseados, se conoce como masa cocida; en el tacho, la masa está sobresaturada de sacarosa. En una solución sobresaturada y exenta de cristales, no siempre el exceso de sacarosa disuelta se deposita o separa de la solución, pero si se agrega a la solución una porción de cristales de soluto, el exceso comienza a depositarse, es decir, a cristalizar (Páez, 2013).

✓ Etapa de centrifugación

En esta etapa la masa cocida se lleva hacia las centrífugas para separar el cristal de azúcar de la miel. Las centrífugas son equipos que giran a altas

revoluciones por minuto y poseen en su interior una malla de finos agujeros que permiten solamente el paso de la miel, mientras que bloquea el paso de los granos de azúcar, los cuales permanecen atrapados en la parte interna de la malla. La miel obtenida al centrifugar la masa primera se conoce como miel primera y se utiliza para elaborar los cocimientos de la masa segunda, la cual se centrifuga en diferentes centrifugas a las usadas anteriormente.

La miel obtenida al centrifugar la masa segunda se conoce con el nombre de miel segunda y se usa para elaborar otro tipo de masa, conocida como masa tercera y que al centrifugarla da una miel conocida como miel final o miel de purga, de la cual es muy difícil recuperar más sacarosa por el mecanismo de cristalización (Páez, 2013), porque es un subproducto del proceso fabril y no retorna al proceso por su bajo contenido de sacarosa (Cardona, 2009).

1.2 Filtros al vacío rotatorios de cachaza

Los esquemas tecnológicos actuales del proceso de producción de azúcar crudo disponen como equipo de filtración al filtro rotatorio al vacío. Estos se ajustan bien en aplicaciones donde se requiere efectuar tanto deshumidificación como lavado y parecen ser los mejores equipos disponibles para el tratamiento de los lodos de caña de azúcar (Rein, 2012). En la figura siguiente se muestra un filtro rotatorio moderno de lodos:

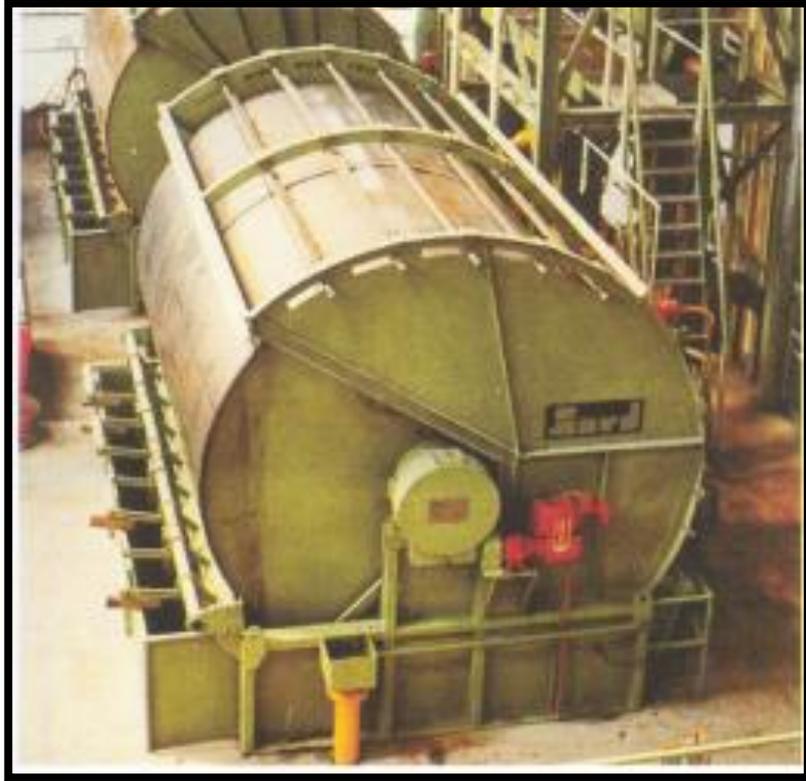


Figura 1.1: Filtro rotatorio de lodos moderno (Fuente: Rein, 2012)

El filtro rotativo al vacío está compuesto por un tambor fabricado en acero inoxidable que gira en torno a su eje horizontal; el que se sumerge en los lodos cerca de un tercio de su tambor (Hugot, 1988).

Estructuralmente se divide en 24 secciones de 15° cada una. El tambor está constituido por tres sectores: en el primer sector se encuentra una etapa de bajo vacío para adherir la torta al tambor y proceder al lavado mediante aspersores. El segundo sector cuenta con una etapa de alto vacío mediante el cual se succiona el jugo a través de las mallas de acero inoxidable provisto de finas perforaciones. El último sector está conectado a la atmósfera para desprender la torta mediante raspadores (Jenkins, 1971). En la figura siguiente se ofrece un diagrama de las diferentes secciones de este filtro rotatorio al vacío:

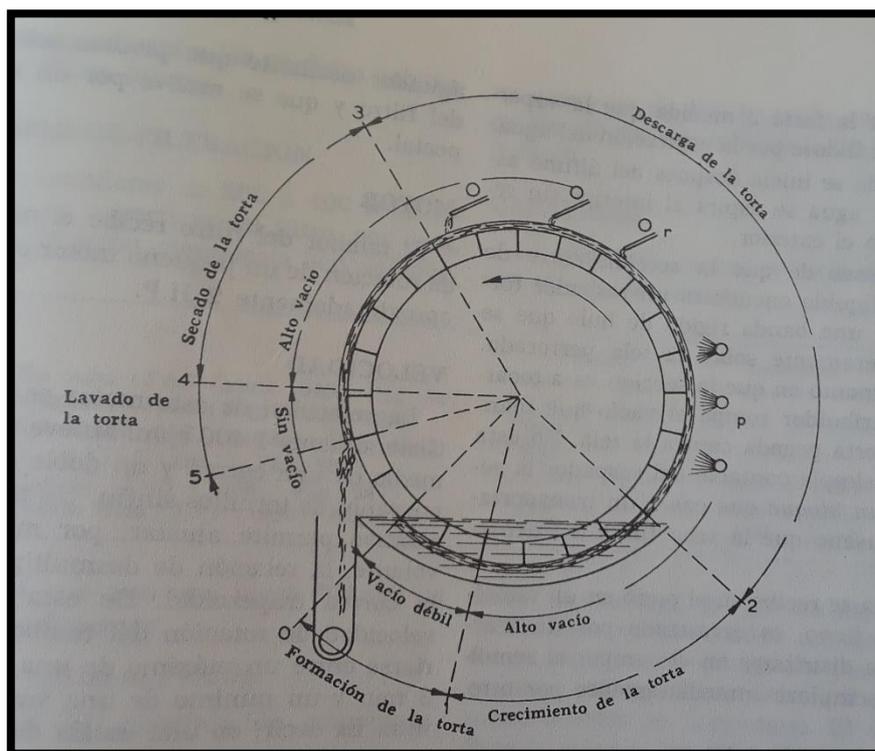


Figura 1.2: Secciones de un filtro rotatorio al vacío (Fuente: Hugot, 1988)

En este tipo de filtros el flujo pasa a través de una tela cilíndrica rotatoria, de la que se puede retirar la torta de manera continua. La fuerza más común aplicada es la de vacío. En estos sistemas la tela se soporta sobre la periferia de un tambor sobre los que se está formando la torta. El tambor gira a una velocidad muy baja (de 1 a 2 rpm) y la superficie de filtrado puede variar entre 0,3 y 80 m² (Rein, 2012).

El tema de la capacidad del sistema de filtración de cachaza es poco analizado actualmente en esta industria. En la mayoría de los casos los filtros trabajan a valores superiores a su capacidad de diseño, sin tener en cuenta que esto puede ocasionar la formación de una gruesa torta de cachaza con la consecuente disminución de su permeabilidad y elevados valores de pol en cachaza (Vega y López, 2019).

Una significativa desventaja del filtro rotativo al vacío para cachaza común es que ellos no producen una torta de baja humedad para desecharla de acuerdo a las buenas prácticas de transportación y el medio ambiente. Igualmente, la

cantidad de jugo de los filtros varía entre un 15 y 25 % de la caña, y su retorno al jugo alcalizado provoca una reducción de la carga de los equipos de calentamiento y la clarificación (Batule, 2009)

1.3 Operación del proceso de filtración

Los parámetros más importantes en la operación de la etapa de la filtración según Hugot (1988) es la pol y la humedad de la cachaza. Jenkins (1971) destaca que los mejores valores de pol en cachaza se encuentran cercanos a 1,0 % y dependen del tipo de filtro utilizado, de la cantidad de agua de lavado y de las características de la torta. Arca (1988) por su parte, establece que el porcentaje de pol en cachaza debe estar entre 1,5 y 3,0% mientras que para AZCUBA (2013) debe ser inferior al 2,0 %.

Con relación a la humedad, Arca (1988) y Hugot (1988) plantean que debe estar entre 75 y 80 %, mientras que AZCUBA (2013) acota un rango más pequeño de 74 a 76%.

La operación de filtración para garantizar un adecuado cumplimiento con estos valores depende (a favorables condiciones de vacío) principalmente del acondicionamiento de los lodos con bagacillo así de la cantidad y temperatura del agua de lavado como variables manipulables para el control de la etapa.

✓ Dosificación de bagacillo

La correcta adición del bagacillo para condicionar la compresibilidad de la torta es de gran significación en el buen desenvolvimiento operacional de la filtración. El bagacillo debe provenir preferiblemente de filamentos de fibra cortos y de la médula, para tener una forma de partícula satisfactoria. Los filamentos de fibra largo tienen una capacidad filtrante insignificante y son, de hecho, perjudiciales (Hugot, 1988)

La cantidad de bagacillo que se suministra es usualmente suficiente para mantener la proporción de bagacillo (fibra) en la alimentación de los filtros en el rango de 0,2 a 0,5 kg de fibra seca/ 100 kg de caña; aunque para el caso en que exista excesiva materia extraña puede llegar a ser de 0,5 a 0,7 kg de fibra/ 100 kg de caña. A su vez, este debe ser muy fino, menor que 0,85 mm en diámetro para una correcta operación (Rein, 2012).

La cantidad y calidad del bagacillo que se adiciona a los lodos que alimentan a los filtros es el más simple factor que afecta en la resistencia de la torta de cachaza. La adición de suficiente bagacillo fino incrementa la porosidad de la torta y mantiene una retención de sólidos alta. Las partículas de bagazo grandes tales como la paja a menudo se presentan en el bagacillo, pero no suministran beneficios de porosidad o de lavado de la torta del filtro (Batule, 2009).

El bagacillo según Hugot (1988) debe ajustarse de tal manera que defina una torta de un espesor aproximado de 1 cm. De esta manera según este autor se deben generar 4 kg de torta por cada 100 kg de caña molida, lo que tipifica una relación entre 60 y 70 kg de torta por m² de superficie filtrante en una hora.

A través de estos elementos se aprecia la importancia de una adecuada adición de bagacillo; sin embargo este no constituye una variable fácilmente manipulable para el control operacional. Este se debe aplicar correctamente y en dependencia de la consistencia de la torta que resulte; dosificar consecuentemente el agua de lavado.

✓ Dosificación del agua de lavado

El pol en la torta de filtros o cachaza se reduce mediante la aplicación de agua de lavado sobre la superficie de los filtros. La cantidad de agua aplicada está típicamente en el rango de 1,0 a 2,0 kg/kg torta, o 6,5 a 13,0 kg agua de lavado/kg sólidos de lodo en cachaza. La cantidad total de agua utilizada representa alrededor de una cuarta parte del flujo de agua de imbibición usado en los trenes de extracción. Usualmente el lavado se aplica luego de la sección de adhesión o formación de torta a través de varias filas de boquillas atomizadoras para aplicar agua caliente a manera de rocío sobre la torta de filtros (Rein, 2012).

Si la razón de agua de lavado se controla efectivamente, el incremento de la misma disminuye la pol en la cachaza. Sin embargo, la máxima cantidad de agua que puede ser aplicada efectivamente a la torta de cachaza depende de la porosidad de la misma y su resistencia; ya que el agua se puede escurrir sobre la superficie filtrante sin penetrar sobre esta o bien, despegar la torta adherida a la tela con altas pérdidas de sacarosa (Batule,2009).

Según Rein (2012) la reducción en la pérdida de pol por incremento del lavado tiene que ser balanceada con respecto a:

- ✓ La capacidad de la torta para absorber la cantidad adicional de agua sin canalización e ineficiencias.
- ✓ La reducción de pérdidas que habría sido posible obtener con la misma cantidad de agua si se aplicase como imbibición adicional en el proceso de extracción.
- ✓ La demanda adicional de vapor de proceso requerido para evaporar la cantidad adicional de agua.
- ✓ La tendencia a menores purezas del jugo filtrado al incrementarse el agua de lavado (algunas impurezas parcialmente solubles se extraen durante el lavado, lo que provoca una caída de pureza entre el filtrado y el jugo clarificado).

Al respecto Hugot (1988) añade que la cantidad de agua de lavado que pasa al jugo claro solamente representa una pequeña fracción del agua adicionada. Por ello, la cantidad del agua de lavado que debe aplicarse se establece principalmente en función de la dilución del jugo filtrado de tal manera que la diferencia del contenido de sólidos disueltos del jugo turbio y claro no sea mayor del 15 a 25 %.

Este autor recomienda una relación entre un 100 y 150 % del agua de lavado respecto a la cantidad de torta. En la figura siguiente se aprecia una vista lateral de la aplicación del agua de lavado en el filtro rotatorio al vacío:

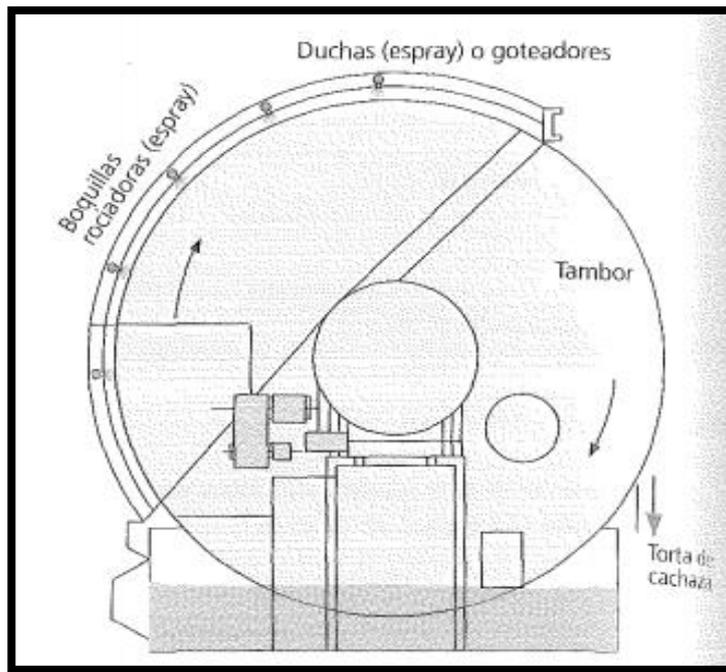


Figura 1.3: Vista lateral de un filtro rotatorio en el que se aplica agua de lavado
(Rein, 2012)

La presión del agua de lavado debe ser de 206 a 275 kPa para que los atomizadores puedan trabajar correctamente mediante la dispersión de esta sobre toda la torta. Cuando la presión es más baja, el cono que forma el atomizador es más pequeño y una gran área de la torta de cachaza no recibe agua para extraerle la sacarosa (Batule, 2009).

- ✓ Temperatura del agua de lavado

La oportunidad para que se desarrollen pérdidas microbiológicas durante el filtrado es relativamente alta, especialmente cuando se deja que la temperatura de los lodos descienda por debajo de los 75 °C (Rein, 2012).

A criterio de esta autor, es importante mantener temperaturas elevadas en la alimentación de filtros y el agua de lavado para minimizar las pérdidas microbiológicas en los filtros de cachaza y alrededor de ellos. Sin embargo, ACUBA (2013) establece que debe estar entre 60 a 65 °C; mientras que Batule (2009) plantea que como máximo debe ser de 60 °C en base a las de impurezas que se podrían incorporar.

Hugot (1988) acota que debe estar entre 75 y 80 °C; no obstante reconoce que a valores superiores a 60 °C se extraen ceras y almidones que afectan considerablemente la filtrabilidad de la torta.

De modo general, se evidencia que no existe un criterio claramente definido en cuanto a los mejores valores de temperatura para el lavado. Los valores que se plantean con anterioridad parten del juicio de los autores sin la justificación o referencia de estudios e investigaciones al respecto. El principal compuesto indeseable que se extrae es el almidón.

En la tabla siguiente se resumen los valores de las principales variables operacionales para un comportamiento satisfactorio de la etapa según Rein (2012):

Tabla 1.1: Parámetros de operación de la filtración según Rein (2012)

| Parámetro de operación | Valor | | |
|---|-------|---------|--------|
| | Bajo | Elevado | Típico |
| Vacío de adhesión de torta en kPa absolutos | 30 | 70 | 50 |
| Vacío de lavado en kPa absolutos | 25 | 40 | 30 |
| Temperatura de alimentación del lodo en °C | 70 | 95 | 80 |
| Frecuencia de rotación del tambor en min/revolución | 2 | 10 | 6,6 |
| Frecuencia del agitador de la bota en min ⁻¹ | 2 | 10 | 5 |
| Espesor de la torta en filtros en mm | 5 | 25 | 12.5 |
| Proporción de fibra en la torta | 0,3 | 0,8 | 0,5 |
| Retención de sólidos de lodo en % | 60 | 95 | 85 |
| Sólidos de lodo en cachaza en g/100 g | 15 | 25 | 20 |
| Sólidos totales en cachaza en g/100 g | 22 | 37 | 30 |
| Temperatura de agua de lavado en °C | 80 | 95 | 90 |
| Flujo de agua de lavado en g/100 g torta | 80 | 320 | 200 |
| Flujo de agua de lavado en g/100 g sólidos de lodo en torta | 400 | 1 600 | 1 000 |

Fuente: Rein (2012)

1.4 Influencia del almidón en la producción de azúcar crudo

La presencia de algunos polisacáridos indeseables en los jugos de la caña de azúcar tal como el almidón, puede ocasionar consecuencias irreversibles en la producción de azúcar crudo y provocar pérdidas, de ahí la importancia del estudio de su influencia (Jiménez, 2017). En los estudios de Alencar, *et al.* (2011), determinan que las variedades de la caña de azúcar presentan diferentes contenidos de almidón y de otras impurezas asociadas. También, establece que el contenido de almidón es más alto en cañas inmaduras con respecto a las maduras y se observa que el mismo decrece cuando la maduración en la caña de azúcar aumenta. Según Zossi, *et al.* (2008) la concentración del almidón en la caña depende de la variedad, la cual oscila entre 200 y 1200 mg/L.

Otros como Viginotti, *et al.* (2014) declaran que el contenido de almidón en el jugo de caña se encuentra en un rango de 1600 a 2600 mg/L, pero esto depende de diferentes factores como: la variedad y madurez de la caña que se procesa.

El almidón entra en la fábrica en forma de gránulos que pueden dispersarse fácilmente en el jugo durante el proceso de maceración. Posteriormente, en el proceso de gelatinización causado por el calentamiento en la clarificación, se acaba de disolver y así se concentran en las mieles.

Rein (2012), menciona que, en el proceso de molienda, gran parte del almidón que es insoluble en la caña se solubiliza por efecto del calor y pasa a los jugos; una parte se elimina en la clarificación, mientras el resto de alguna manera permanece en el proceso. Entre un 30 % y 40 % de este polisacárido se incrusta en el cristal de azúcar crudo durante la cristalización.

Durante el proceso de clarificación el almidón se hace parcialmente soluble eliminándose una fracción, mientras que otra parte pasa a la meladura. Si la cantidad de almidón que pasa a la meladura es mayor de 150 ppm comienzan a existir afectaciones en el proceso.

Se determina que el tamaño del almidón es de 1 a 6 μm y estas partículas tienden a coagularse a temperaturas entre los 65 y 80°C. Esta coagulación forma partículas densas y de gran tamaño que pueden aumentar la viscosidad de la meladura, lo que provoca la disminución de la velocidad de la cristalización en

los tachos, impide el agotamiento de las mieles y dificultan la purga en las centrífugas (Penados, 2004).

En consideración a lo anterior, contenidos de almidón en jugo, mayores a 200 mg/L, causan problemas durante el proceso de elaboración de azúcar crudo, entre los principales están: el aumento de la viscosidad por efecto de la gelatinización de los gránulos de almidón, la dificultad en los procesos de filtración, decantación, evaporación y cristalización.

De acuerdo con esto, Penados (2004) determina que el almidón reduce la calidad del jugo y azúcar crudo porque demora o inhibe la cristalización y aumentan las pérdidas de azúcar en la miel final. También, establece que debido a su naturaleza de carbohidratos y su gran solubilidad es muy difícil de remover en el proceso; tiene la tendencia de ocluirse en el cristal de azúcar crudo.

Así que representa una pérdida en términos de azúcar disponible para el proceso, por causar demoras en el proceso debido a viscosidades excesivas y pérdidas de sacarosa por modificaciones en el crecimiento del cristal. El almidón constituye una impureza del jugo de caña de azúcar y trae efectos adversos en los procesos de producción y refinación del azúcar crudo. Como consecuencia se afecta la cantidad y calidad del azúcar producido (Eggleston, *et al.*, 2006).

El contenido de almidón es consecuencia del metabolismo de la caña, y la industria no influye en nada sobre eso. Generalmente, el almidón es insoluble a temperaturas bajas, pero al momento que el licor alcanza 60 °C el almidón se gelatiniza. Esto ocurre cuando los gránulos de almidón se hinchan y ocupan grandes volúmenes de espacio.

La solubilidad del almidón a altas temperaturas aparece cuando las viscosidades del licor aumentan (Penados, 2004). Aunque en el proceso de producción de azúcar crudo durante la etapa de clarificación se elimina una gran parte, el almidón soluble producto de la gelatinización por el efecto de la temperatura permanece en el jugo de caña de azúcar, y de esta manera continua en todo el proceso (Zhou, *et al.*, 2008).

El contenido de almidón es un parámetro importante a considerar durante el proceso de elaboración de azúcar crudo, en la industria, es común cuantificar su

contenido en el proceso para disminuir sus efectos negativos en la capacidad productiva (Zossi, *et al.*, 2008).

En varios estudios se expresa que el almidón reduce la filtración y la afinación del azúcar crudo, y constituye un impedimento para el proceso de decoloración en la refinación (Eggleston, *et al.*, 2006). De acuerdo con la información anterior, se concibe que, ejerce una influencia considerable en la viscosidad de las masas cocidas y puede doblegar dicha viscosidad al reducir la calidad de las mismas.

Conclusiones parciales de la revisión bibliográfica:

1. No se encuentra claramente establecido un criterio para la temperatura del agua de lavado a emplearse en la etapa de filtración de lodos al vacío.
2. El flujo de agua de lavado constituye la mejor variable operacional para el control de la etapa de filtración; cuyo ajuste depende consecuentemente de las características de la torta, dilución del jugo filtrado y agotamiento de la cachaza.
3. La extracción de impurezas, fundamentalmente ceras y almidón en el proceso de filtración suponen graves consecuencias para el proceso productivo y la calidad del azúcar

Capítulo II: Materiales y métodos

En este capítulo se abordan los materiales y la metodología a seguir en la presente investigación. Esencialmente se compone de tres partes fundamentales. La primera concierne al análisis del proceso filtración a nivel de laboratorio, lo que permite conocer, bajo condiciones controladas de experimentación, el comportamiento de la extracción de sacarosa e impurezas según la temperatura del lavado. En esta etapa se persigue demostrar su efecto negativo en el proceso y por lo tanto, no concebirla como una variable ajustable en el control operacional sino como un parámetro fijo. A partir de ello, se prosigue en una segunda etapa en la metodología, que corresponde a la obtención de correlaciones para una mejor dosificación del agua de lavado y finalmente, a partir de los modelos matemáticos se describe el procedimiento para la construcción de herramientas gráficas que permiten una mejor operación y control de la etapa. Esta investigación se efectúa en el CAI "Jesús Rabí" de la provincia de Matanzas.

2.1. Etapa de filtración de lodos al vacío

Se cuenta con dos filtros rotatorios al vacío de tambor con una superficie filtrante de 58 m² cada uno. El tambor posee 3 m de diámetro y 6 m de longitud y requiere una potencia de 2,1 kW para su accionamiento. Normalmente la presión de bajo vacío es de 50 kPa mientras que la de lavado es de 30 kPa (presión absoluta). El porcentaje de bagacillo en la torta de cachaza es del 50 %.

Para una adecuada operación, el porcentaje de pol en cachaza debe ser inferior a 2 % mientras que su humedad no mayor del 75 %. La cantidad de cachaza debe representar un 5 % de la molida y el jugo filtrado debe tener un porcentaje de sólidos disueltos del orden de los 11 °Bx, de acuerdo a las normas operacionales establecidas por la dirección tecnológica del central.

Estos emplean como agua de lavado los condensados vegetales del tercer y

cuarto vaso del múltiple-efecto, que se esparce en la superficie del tambor mediante aspersores. Los filtros presentan una velocidad de rotación de 3 ppm, aunque se puede regular de forma manual mediante una caja de velocidades según la calidad de los lodos.

El jugo filtrado turbio y claro de cada equipo no se procesa de forma independiente, sino que se mezclan en un tanque de recepción para el bombeo hacia el tanque de alcalizar. Se controla la cantidad de cachaza filtrada mediante el pesaje de los camiones que la trasladan para su comercialización como alimento animal o deshecho en las zonas aledañas a la instalación.

La instrumentación en el área es muy pobre, solamente se cuentan con manómetros para controlar las presiones de alto y bajo vacío de la filtración. Existe una adecuada disciplina tecnológica en cuanto a limpieza y mantenimiento del filtro en las paradas tecnológicas, lo que permite que las mallas filtrantes no estén tupidas. Esta se compone de orificios circulares de 0,50 mm de diámetro, con arreglo escalonado, espaciados a 1,143 mm y su material de construcción es acero inoxidable.

2.2 Determinación del comportamiento de la extracción de sacarosa e impurezas para diferentes condiciones de lavado

Se procede al análisis del proceso de filtración a nivel de laboratorio con el propósito de definir el comportamiento de la extracción de sacarosa, almidón y gomas acuosolubles bajo condiciones controladas de experimentación. Mediante ello se tienen en cuenta en los experimentos parámetros y variables que son difíciles de mantener constantes a nivel industrial como son: el porcentaje de bagacillo, el contenido de sacarosa y almidón en lodos; los están sujetos a una alta variabilidad en el proceso. Aunque los resultados que se obtienen no se pueden extrapolar cuantitativamente al plano industrial, son totalmente válidos para establecer la influencia de la temperatura del agua de lavado sobre el agotamiento de la cachaza y la extracción de tales impurezas.

2.2.1 Consideraciones generales de la experimentación

Para este análisis se emplea la metodología de superficie respuesta (MSR) a través de un diseño estadístico de experimentos. Se emplea este tipo de diseño

y no uno de tamizado (que requiere menos experimentación) porque es de interés establecer el comportamiento de la extracción que se describe a través del modelo de superficie. Se establecen como factores experimentales, la cantidad y temperatura del agua de lavado de los filtros y como parámetros fijos, la cantidad de lodos y la presión de vacío.

Se definen como variables respuesta: la extracción de sacarosa; el contenido de sacarosa aparente en cachaza (pol en cachaza), la pureza del jugo filtrado así como el porcentaje de sacarosa, almidón y gomas acuosolubles que se incorporan por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída.

En la experimentación se emplea como medio filtrante la malla de los filtros de este proceso y se efectúan las etapas de filtración a las presiones que se aplican a nivel industrial.

De ensayos exploratorios previos, se establece que 450 g de lodos son suficientes para la filtración a esa presión durante 5 minutos en cada etapa y obtener la cantidad de jugo requerida por las diferentes determinaciones experimentales. Para tales condiciones, se alcanza una humedad de la cachaza entre 75 y 80 %; semejante a la del proceso a escala industrial (AZCUBA, 2013).

Esta cantidad de lodos define una torta de aproximadamente 12 mm de espesor, que se concuerda con lo establecido por Rein (2012). Se controla el porcentaje de bagacillo en los lodos de filtración y su distribución granulométrica.

Tal como se plantea, el agua de lavado de los filtros proviene del sistema de reutilización de condensados de vapores vegetales, lo que hace que se consideren aguas de uso tecnológico "calientes". Por tal motivo, su efecto de analiza a valores entre 50 y 95 °C. Este intervalo contempla los valores comunes de operación y los criterios de Rein (2012), Batule (2009), Hugot (1988) y AZCUBA (2013).

La cantidad de agua de lavado de los filtros se analiza según lo recomendado por la dirección tecnológica de AZCUBA en AZCUBA (2013). Esta plantea que debe ser como máximo un 150 % de la cantidad de cachaza, con lo cual coincide Batule (2009). A su vez, Rein (2012) establece como dosificación típica, una relación de agua de lavado de 200 g por cada 100 g de torta; con una variación

entre 80 y 320 g. Sobre la base de eso, el agua de lavado se evalúa entre 135 mL y 1 620 mL, lo que representa un 30 y 360 % de la cantidad de lodos de la porción de análisis (450 g).

En la tabla siguiente se resumen dichas condiciones experimentales:

Tabla 2.1: Condiciones experimentales

| Parámetro y/o variable experimental | Valor |
|---|-----------------------------|
| Cantidad de lodos | 450 g |
| Tiempo de filtración de cada etapa | 5 minutos |
| Presión de filtración en la primera y segunda etapa | 50 y 30 kPa respectivamente |
| Temperatura del agua de lavado | 50 a 95 °C |
| Cantidad de agua de lavado | 135 a 1 620 mL |

2.2.2 Determinación de las variables respuestas

El porcentaje de extracción de sacarosa se establece en base a la cantidad de sacarosa presente en el jugo filtrado y en lodos, tal como se contempla en la expresión siguiente:

$$E_{pol} = \frac{pol_{JF}m_{JF}}{pol_Lm_L} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

Donde:

E_{pol} : Extracción de sacarosa (%)

pol_{JF} : Composición de sacarosa aparente en jugo filtrado (%)

m_{JF} : Masa de jugo filtrado (g)

pol_L : Composición de sacarosa aparente en lodo (%)

m_L : Masa de lodo del análisis (g)

A su vez, la composición de sacarosa en el jugo filtrado se calcula a través de la ecuación siguiente:

$$pol_{JF} = \frac{pol_{JT}m_{JT} + pol_{JC}m_{JC}}{m_{JT} + m_{JC}} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

Donde:

pol_{JT} : Composición de sacarosa aparente en jugo turbio (%)

m_{JT} : Masa de jugo turbio (g)

pol_{JC} : Composición de sacarosa aparente en jugo claro (%)

m_{JC} : Masa de jugo claro (g)

Esto se debe a que no se pueden mezclar el jugo turbio y claro para constituir al jugo filtrado. Tal como se aprecia con posterioridad, se requiere caracterizar individualmente las muestras de jugo turbio y claro que resultan.

El contenido de sacarosa de los lodos de filtración se determina como:

$$pol_L = \frac{pol_{JF}m_{JF} + pol_{Ca}m_{Ca}}{m_L} \quad (2.3)$$

Donde:

pol_{JC} : Porcentaje de sacarosa aparente en cachaza (%)

m_{JC} : Masa de cachaza (g)

La pol en cachaza se obtiene de forma directa por vía experimental, mientras que para la pureza del jugo filtrado:

$$prza_{JF} = \frac{Bx_{JF}}{pol_{JF}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Donde:

$prza_{JF}$: Pureza del jugo filtrado (%)

Bx_{JF} : Contenido de sólidos disueltos del jugo filtrado (°Bx)

El contenido de sólidos disueltos del jugo filtrado se determina a través de la expresión siguiente:

$$Bx_{JF} = \frac{Bx_{JT}m_{JT} + Bx_{JC}m_{JC}}{m_{JT} + m_{JC}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Donde:

Bx_{JC} : Contenido de sólidos disueltos del jugo claro (°Bx)

Bx_{JT} : Contenido de sólidos disueltos del jugo turbio (°Bx)

El porcentaje de sacarosa que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída se calcula como:

$$I_{pol} = \frac{pol_{JC}m_{JC}}{pol_{JC}m_{JC} + pol_{JT}m_{JT}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Donde:

I_{pol} : Porcentaje de sacarosa que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

El porcentaje de sacarosa que se incorpora por efecto del lavado se define para analizar en un mismo término la extracción de sacarosa que se verifica bajo determinadas condiciones de lavado y la cantidad de impurezas que se incorporan por este efecto. Resulta imposible establecer un porcentaje de almidón o gomas "extraíbles" en los lodos (homólogo en términos de azúcar a la pol en caña), producto a que estos provienen del jugo y de las estructuras vegetales, lo que indudablemente dificulta su cuantificación.

Entonces, el porcentaje de almidón que se incorpora por efecto del lavado se determina como:

$$I_{alm} = \frac{alm_{JC}V_{JC}}{alm_{JC}V_{JC} + alm_{JT}V_{JT}} \cdot 100 \% \quad (2.7)$$

Donde:

I_{alm} : Porcentaje de almidón que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

alm_{JC} : Concentración de almidón en jugo claro (mg/mL)

V_{JC} : Volumen de jugo claro (mL)

alm_{JT} : Concentración de almidón en jugo turbio (mg/mL)

V_{JT} : Volumen de jugo turbio (mL)

Para el caso de las gomas acuosolubles se tiene que:

$$I_{ga} = \frac{ga_{JC}V_{JC}}{ga_{JC}V_{JC}+ga_{JT}V_{JT}} \cdot 100 \% \quad (2.8)$$

Donde:

I_{ga} : Porcentaje de gomas acuosolubles que se incorpora por efecto del lavado con relación a la cantidad total extraída (%)

ga_{JC} : Composición volumétrica de gomas acuosolubles en jugo claro (%)

V_{JC} : Volumen de jugo claro (mL)

ga_{JT} : Composición volumétrica de gomas acuosolubles en jugo turbio (%)

V_{JT} : Volumen de jugo turbio (mL)

2.2.3 Planificación del trabajo experimental a través de la MSR

La planificación del trabajo experimental se establece mediante el *software* estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI (versión 16.2.04). Como se cuentan con dos factores experimentales (k), se selecciona un diseño factorial a tres niveles 3^k . Para este caso, es el diseño estadístico de experimentos que menos experimentación requiere y que presenta mejor calidad en cuanto a la disposición espacial de combinación de factores.

Al diseño de experimentos se le incorpora aleatoriedad para evitar errores asociados o impuestos por condiciones no controlables de la experimentación con relación al orden o secuencia de los experimentos. Para una mejor calidad en la modelación, se le adiciona un punto en el centro y dos réplicas al diseño en general. Ello implica un total de 30 corridas experimentales con 22 grados de libertad del error.

La superficie respuesta queda definida según Montgomery (2017) por un modelo de la estructura general siguiente:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.9)$$

Donde:

\hat{y} : Variable respuesta predicha

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$: Coeficientes de regresión correspondientes al intercepto, términos lineal, cuadrático y de interacción entre los factores experimentales respectivamente.

X_i, X_j : Variables independientes (factores experimentales)

k : Número de factores experimentales (en este caso dos)

En el anexo 1 se ofrecen las condiciones de lavado para cada corrida experimental.

2.2.4 Desarrollo de la experimentación

Para la experimentación se emplea una muestra de lodos lo más representativa posible de la del proceso industrial, la que se toma en distintos puntos del compartimento de lodos de ambos filtros. Esta muestra se coloca en baño de María (HH. S Series, China) para mantener su temperatura constante a 80 °C; valor típico en la práctica ingenieril y que coincide con lo establecido por Rein (2012). Ello es de gran importancia en la experimentación, de lo contrario, el enfriamiento de los lodos interferiría en el efecto de la temperatura del agua de lavado.

Se procede a una primera filtración a 30 kPa y durante cinco minutos, que simula a la formación de la torta a través del bajo vacío en el proceso industrial. Mediante de esta se obtiene el primer jugo (turbio), al que se le determina su masa y volumen. Para ello se tara previamente el kitasato de recepción de jugo y se pesa en balanza técnica de precisión 0,1 g (WT-G, China); mientras que la determinación del volumen se realiza mediante una probeta de 1 000 mL.

Luego, con la torta formada se procede a adicionar el agua de lavado lo más uniformemente posible sobre el lodo a las condiciones establecidas en el diseño.

A partir de ello se realiza una segunda filtración a 50 kPa, que implica el lavado y secado de la torta. La temperatura del agua de lavado se regula mediante un baño de María.

En la figura tal 2.1 se ofrece un resumen del procedimiento experimental:

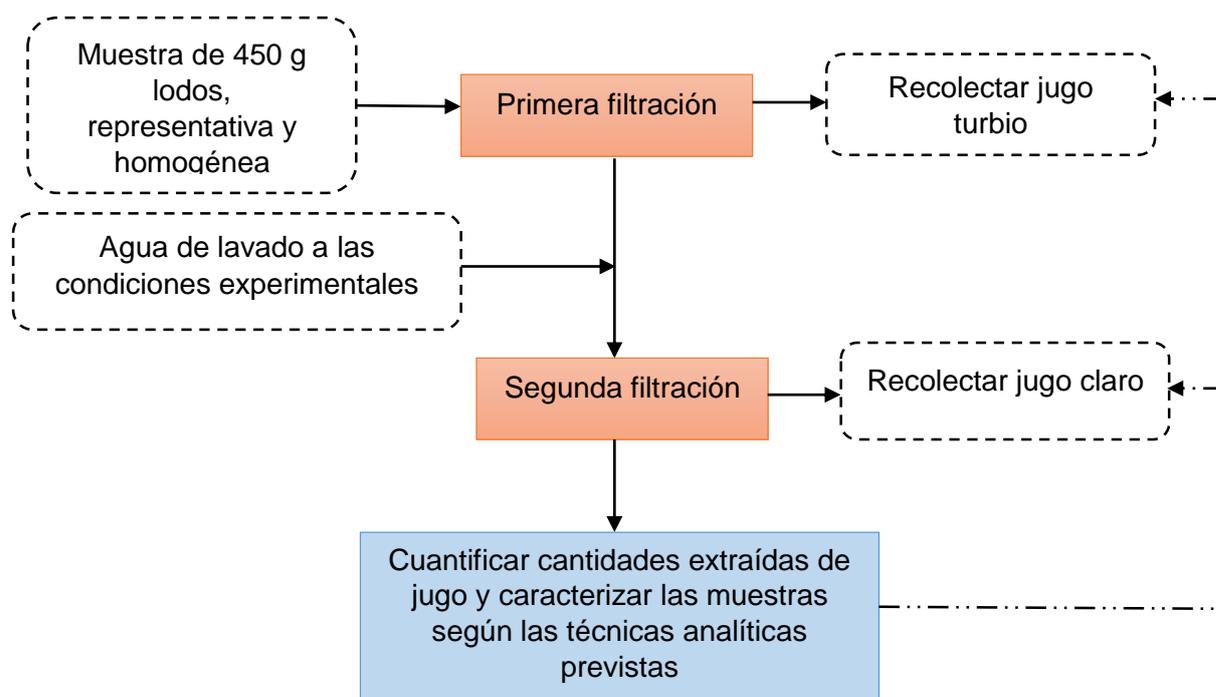


Figura 2.1: Procedimiento experimental

El contenido de bagacillo en cachaza se determina por la técnica número 27 de MINAZ (2006) y su distribución granulométrica por la metodología propuesta por Rosabal y Garcell (2006) con una tamizadora (Tpz-2, China) y una balanza técnica (WT-G, China) con precisión de 0,1 g.

La humedad de la cachaza se obtiene por la técnica número 12 de MINAZ (2006) mediante gravimetría. La determinación del porcentaje de sacarosa aparente en cachaza y jugos se efectúa de acuerdo al método de la masa normal, mediante la clarificación, decoloración y eliminación de la turbiedad de soluciones azucaradas a través de una solución de acetato básico de plomo (II). Este procedimiento se ofrece en la técnica analítica número diez de MINAZ (2006). Para ello, se dispone de un polarímetro (WZZ-2S, China).

El porcentaje de sólidos disueltos en el jugo filtrado se establece según el procedimiento analítico número 8 de MINAZ (2006) a través de un refractómetro digital (PDR-35, China).

Para la concentración de almidón se emplea la técnica analítica número 28 de MINAZ (2006) a través de un espectrofotómetro (UV-1700, China). Para ello se necesita de una curva de calibración, que se realiza a partir de la absorbancia de patrones de concentración conocida de almidón de papa reactivo, tal como se especifica en dicho procedimiento analítico.

En cambio, la determinación de gomas se determina a partir del procedimiento analítico número 46 de MINAZ (2006). Este se basa en la precipitación que experimentan estas gomas acuosolubles por el cambio de solubilidad a través de etanol al 95 % (v/v).

2.2.5 Procesamiento estadístico de los resultados experimentales

Con los resultados experimentales se efectúa el procesamiento estadístico en STATGRAPHICS Centurion XVI (versión 16.2.04). La significación de los factores experimentales (efectos) y sus interacciones sobre la respuesta se establece a partir de un análisis de varianza para un 95 % de confianza; lo que se ilustra en el diagrama de Pareto.

Luego, al modelo de superficie respuesta que se obtiene y que involucra los efectos significativos sobre la respuesta, se le analiza su calidad de ajuste en base a la prueba de Fisher y al comportamiento entre el valor observado y el intervalo de predicción para un 95 % de confianza. También se realiza la prueba de Durbin-Watson (DW) para detectar alguna posible correlación entre los errores experimentales tal como lo hacen Colón *et al.* (2017) y Jiménez *et al.* (2015).

Debe existir una adecuada correspondencia entre los valores observados y predichos de la respuesta sobre la diagonal de 45° así como, no existir ninguna relación gráfica entre los errores experimentales (este último complementa los resultados del estadígrafo de DW).

A través de estas determinaciones se puede demostrar que operar a elevados valores de temperatura del agua de lavado no resulta beneficioso para la extracción, dado que se incorporan a la etapa de purificación una alta carga de almidón e impurezas referidas genéricamente como gomas. Por ello, no se considera a la temperatura del agua de los filtros como una variable de control, sino como un parámetro que debe permanecer fijo entre 60 y 65 °C; valores máximos que se establecen en AZCUBA (2013).

2.3 Modelación del proceso de filtración a nivel industrial

Resulta de gran importancia disponer de modelos matemáticos como herramientas para un mejor control operacional de la etapa. Estos deben contemplar variables que sean fácilmente medibles en el proceso para una mejor aplicabilidad. Se establece como variable ajustable en el control solamente el flujo de agua de lavado y no a la temperatura de esta, de acuerdo a los resultados que se persiguen en el epígrafe anterior.

La modelación se efectúa mediante regresión a partir de diferentes observaciones experimentales. Para ello, solamente se manipula el flujo del agua de lavado a una temperatura controlada entre 60 y 65 °C. La variación del flujo de agua se realiza de forma manual mediante las válvulas correspondientes a la línea de suministro y se determina a través de un flujómetro ultrasónico de alta precisión (TDS-100P, China). La medición de los parámetros respuesta del proceso se efectúan luego de 20 minutos de aplicarse la modificación en el flujo de lavado, para que las observaciones correspondan a condiciones de proceso estabilizadas.

Se establece la cantidad de agua de lavado que se analice desde 0 a 200 % de la cachaza con un incremento de 20 %; intervalo contempla el valor máximo establecido por AZCUBA (2013) de 150 %. Las observaciones se efectúan con aleatoriedad y tres réplicas. Es importante que la presión de alto y bajo vacío cumplan con los valores normados, lo que se comprueba a través de la instrumentación del área.

En la modelación se establece como término independiente la relación entre el flujo volumétrico de agua de lavado y la cantidad de cachaza, el que se emplea por Wright (2005) para predecir la pol de la cachaza.

Se establecen como variables dependientes: pol y humedad en cachaza, porcentaje de remoción de insolubles así como el contenido de sólidos disueltos y flujo de jugo filtrado; variables que imperativamente se deben considerar en el control operacional del área. De esta manera se obtienen correlaciones de la forma siguiente:

$$f\left(\frac{AL}{C}\right) = pol_C \quad (2.10)$$

$$j\left(\frac{AL}{C}\right) = Hmd_C \quad (2.11)$$

$$j\left(\frac{AL}{C}\right) = R_I \quad (2.12)$$

$$g\left(\frac{AL}{C}\right) = Bx_{JF} \quad (2.13)$$

$$h\left(\frac{AL}{C}\right) = JF \quad (2.14)$$

Donde:

AL: Flujo de agua de lavado (m³/h)

C: Flujo de cachaza (kg/h)

Hmd_C : Humedad de la cachaza (%)

R_I : Porcentaje de remoción de insolubles (%)

Bx_{JF} : Porcentaje de sólidos solubles en el jugo filtrado (%)

JF: Flujo de jugo filtrado (m³/h)

El porcentaje de remoción de insolubles se determina como:

$$R_I = \frac{I_L - I_{JF}}{I_L} \cdot 100 \quad (2.15)$$

Donde:

I_L : Contenido de insolubles en lodo (%)

I_{JF} : Contenido de insolubles en jugo filtrado (%)

La determinación de insolubles se realiza mediante la técnica analítica número 22 de MINAZ (2006) mientras que las restantes corresponden a los mismos procedimientos presentados en el subepígrafe 2.2.4. El flujo de jugo filtrado se determina con el flujómetro ultrasónico de alta precisión.

2.3.1 Ajuste de los modelos matemáticos

El ajuste de los datos experimentales se realiza por análisis regresión, según el comportamiento que presenten las variables mediante el programa STATGRAPHICS Centrión XVI (versión 16.2.04).

Es importante garantizar que los resultados sigan una distribución normal para los análisis con referencia a la desviación estándar. Se establecen como criterios fundamentales para ello, los valores de los coeficientes de Curtosis y asimetría así como la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. En caso de algún resultado dudoso, se corrobora con la disposición de la gráfica de distribución en el histograma de frecuencia correspondiente. Para la exclusión de posibles observaciones anormales se procede a aplicar la metodología propuesta en NC92-21 (1980).

Se selecciona la función del modelo de regresión que mejor explica la variabilidad de la respuesta entre las veintisiete propuestas predeterminadas por el programa. A partir de él, se evalúa la dependencia estadística entre las variables involucradas mediante un análisis de varianza, el coeficiente de determinación, el estadígrafo DW y la prueba de calidad de ajuste de Fisher. Se emplean como herramientas gráficas complementarias, la distribución de los

errores experimentales según la fila del experimento y la disposición de las observaciones y predicciones sobre la diagonal de 45°.

2.4 Aplicabilidad de los modelos matemáticos: construcción de gráficos para el control operacional del agua de lavado

Con los modelos matemáticos se construyen diversos gráficos que permitan al operador según, el flujo de cachaza y de agua de lavado, estimar las variables dependientes y hacer un mejor control operacional del proceso.

Es relevante la implementación en un mismo diagrama todos los modelos matemáticos, de tal manera que se obtenga un gráfico “generalizado” que interrelacione las variables dependientes entre sí. De esta manera se puede estimar indirectamente un parámetro operacional respuesta a partir de otro de forma inmediata en caso de que no se precise el término independiente de los modelos matemáticos. Por ejemplo, a partir del contenido de sacarosa de la cachaza se puede establecer su porcentaje de humedad; hecho que indiscutiblemente facilita el control por este sentido si se considera que el laboratorio demora cerca de cuatro horas en reportar el resultado de la determinación analítica correspondiente.

Se emplea el *software* Origin (2017) en su versión SR2-b 9. 4.2.380. Este programa permite de una forma sencilla y visualmente atractiva, la implementación de gráficos con más de un eje “y” con alta calidad de imagen.

Conclusiones:

1. Con un mejor control del agua de lavado se puede mejorar el comportamiento de la etapa de filtración.
2. Mediante la metodología propuesta es posible establecer un sistema de control que permite determinar el flujo de agua adecuado en la etapa de filtración.
3. A través del análisis del proceso de filtración por MSR se puede demostrar que no resulta conveniente operar a elevados valores de temperatura de; agua de lavado, pese a que podría incrementarse la extracción de sacarosa.
4. La obtención de modelos matemáticos que contemplen los términos propuestos permiten la correcta dosificación del agua de lavado.
5. La construcción de gráficos a partir de estos modelos facilita el control operacional del lavado en la etapa de filtración.

Recomendaciones

Desarrollar la metodología que se propone para un mejor control operacional del agua de lavado en la etapa de filtración de lodos al vacío en el proceso de producción de azúcar crudo.

Bibliografía

1. Alencar, J.; Hoffmann, P.; Harumi, H., 2011. "Sugarcane starch: quantitative determination and characterization". *Ciencia e Tecnología de Alimentos*, 31 (3), pp. 806-815.
2. Arca, Manuel P.; Esparza, Raúl; Arca, Manuel E.; Escobar, Rodolfo; Fundora, Gerardo F.; Arca, Camilo A. (1988). *El Consultor: Una guía práctica para solucionar problemas en fábricas de azúcar de caña*. Arca Corporation, Miami, Florida, Estados Unidos.
3. Ayala, A. Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña. Tesis de grado en opción al título de ingeniero químico-industrial. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015. 144 p.
4. AZCUBA. (2013). PO-03-01. Purificación. En "El Consultor" (pp. 12). La Habana.
5. Batule, E. (2009) La filtración en la industria azucarera. En: "Serie Azucarera no. 3" (pp. 333). San Salvador (El Salvador).
6. Cardona, M., 2009. Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo Fletcher Smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira.
7. Colón, J.; Alvarez, C.; Vinot, M.; Lafuente, F. J.; Ponsá, S.; Sánchez, A.; Gabriel, D. (2017). Characterization of odorous compounds and odor load in indoor air of modern complex MBT facilities. "Chemical Engineering Journal", 313, 1311-1319.
8. Eggleston, G.; Montes, B.; Monge, A.; Guidry, D., 2006. "Optimization of α -amylase application in raw sugar manufacture". En: (ed.) ^ (eds.), Proc. Sug. Process. Res. Conf. Brazil, vol., pp. 319-340.
9. Greenwood, J.; Rainey, T.; Doherty, W., 2011. "Light scattering study on the size and structure of calcium phosphate/hydroxyapatite flocs formed in sugar solutions". *Revista Colloid and Interface Science*.

10. Herrera, A.C., 2011. Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichi S.A. Universidad Tecnológica de Pereira.
11. Hugot, E. (1988). Manual para ingenieros azucareros (Vol. 1). La Habana: Edición Revolucionaria.
12. Jenkins, G. Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña. Editorial Ciencia y Técnica, La Habana, 1971
13. Jiménez, A., 2017. Evaluación del comportamiento del contenido de almidón y su desdoblamiento con alfa amilasa en el proceso de producción de azúcar crudo. Tesis en opción al título de: Máster en ingeniería asistida por computadoras. Matanzas: Universidad de Matanzas, 115 p.
14. Jiménez, J.; Guardia-Puebla, Y.; Cisneros-Ortiz; M. E., Morgan-Sagastume; J. M., Guerra, G.; Noyola, A. (2015). Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw, using industrial clay residues as inorganic additive. "Chemical Engineering Journal", 259, 703-714. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.031>
15. Martínez, D., 2019. " Propuesta de modernización del filtro rotativo al vacío para mejorar el proceso de filtrado en la Empresa Agroindustrial Pomalca". Lima: Perú, 123 p.
16. MINAZ. (2006). Manual de métodos analíticos para azúcar crudo (MACU): Instituto cubano de investigaciones azucareras. División de aseguramiento y calidad.
17. Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments (nine Ed.). New York: Wiley.
18. Morales, Y.L; Kafarov, V.; Ruiz, F.; Castillo, E.F. Modelación de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de la caña de azúcar. Etapas; preparación, molienda y clarificación. Umbral Científico, número 16, junio, 2018
19. NC92-21. (1980). *Procedimiento para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones*. La Habana, Cuba.

20. Páez, C.A., 2013. Determinación de las condiciones óptimas para la producción de azúcar turbinado en los parámetros color y tamaño de grano en la empresa Ingenio Risaralda S.A. Universidad Tecnológica de Pereira.
21. Penados, M., 2004. Evaluación del impacto de adicionar la enzima alfa amilasa durante el proceso de evaporación en los niveles de almidón de azúcar crudo producido en un ingenio azucarero. Escuela de Ingeniería Química: Universidad de San Carlos de Guatemala.
22. Pérez, H., 2009. El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos. Ciudad de La Habana, Cuba.
23. Posada, E.D., 1987. Tecnología de la Producción Azucarera. La Habana, Cuba.
24. Rein, P. (2012). Ingeniería de la caña de azúcar: Bartens.
25. Rosabal, J.; Garcell, L. (2006). Hidrodinámica y separaciones mecánicas (3 ed. Vol. 1). La Habana: Félix Varela.
26. Van der Poel, P. W.; Schiweck, H.; Schwartz, T. (1998). *Sugar Technology beet and cane manufacture*. Publicado con el apoyo de la Fundación para el Desarrollo de la Azúcar de Remolacha, Denver, USA.
27. Vega, R; López, B. 2019. Metodología para evaluación de la operación de los filtros de cachaza. México 25 p.
28. Viginotti, F.; Polesi, L.; Lima, C.; Silveira, S., 2014. "Structural and physicochemical characteristics of starch from sugar cane and sweet sorghum stalks". *Carbohydrate Polymers* () 111, pp. 592–597.
29. Wright, P. (2005). Process Benchmarking in cane sugar factories. "Proc. Aust. Soc. Sugar. Cane. Technol" .,27, 437-45
30. Zhou, M.; Kimbeng, C.; Eggleston, G.; Viator, R.; Hale, A.; Gravois, K., 2008. Issues of starch in sugarcane processing and prospects of breeding for low starch content in sugarcane. "Sugar Cane International", 26 (3).

31. Zossi, B.; Navarro, M.; Sorol, N.; Sastre, M.; Marcelo, R., 2008.
“Validación de una metodología para determinar el contenido de almidón
en azúcar”. *Rev. ind. agríc. Tucumán* 85 (2).

Anexos

Anexo 1: Planificación experimental a través de la MSR del análisis del proceso de filtración a nivel de laboratorio.

| No. | Temperatura del agua de lavado (°C) | Cantidad de agua de lavado (mL) |
|-----|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 50,0 | 135,0 |
| 2 | 72,5 | 1625,0 |
| 3 | 95,0 | 1625,0 |
| 4 | 95,0 | 880,0 |
| 5 | 50,0 | 880,0 |
| 6 | 50,0 | 1625,0 |
| 7 | 72,5 | 135,0 |
| 8 | 95,0 | 135,0 |
| 9 | 72,5 | 880,0 |
| 10 | 72,5 | 880,0 |
| 11 | 50,0 | 135,0 |
| 12 | 72,5 | 1625,0 |
| 13 | 95,0 | 1625,0 |
| 14 | 95,0 | 880,0 |
| 15 | 50,0 | 880,0 |
| 16 | 50,0 | 1625,0 |
| 17 | 72,5 | 135,0 |
| 18 | 95,0 | 135,0 |
| 19 | 72,5 | 880,0 |
| 20 | 72,5 | 880,0 |
| 21 | 50,0 | 135,0 |
| 22 | 72,5 | 1625,0 |
| 23 | 95,0 | 1625,0 |
| 24 | 95,0 | 880,0 |
| 25 | 50,0 | 880,0 |

| | | |
|----|------|--------|
| 26 | 50,0 | 1625,0 |
| 27 | 72,5 | 135,0 |
| 28 | 95,0 | 135,0 |
| 29 | 72,5 | 880,0 |
| 30 | 72,5 | 880,0 |