

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



*Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el
título de Ingeniero Químico.*

*Evaluación de la disciplina tecnológica en las áreas
de extracción y purificación del Central
“Jesús Rabí”.*

Autor: Thália Jiménez Labrada.

Tutor: MSc. Santiago Díaz Suárez.

Matanzas, Cuba, 2018

Declaración de Autoridad.

Yo, Thália Jiménez Labrada, declaro ser la única autora de este trabajo de diploma realizado en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo a que el mismo sea empleado como material de consulta por la mencionada institución académica y por el Grupo Empresarial AZCUBA.

Thália Jiménez Labrada

Pensamiento:



“El azúcar es nuestra historia, sin ella es imposible interpretar la esencia y la verdad de Cuba”.

*Jesús Menéndez Larrondo
“El Capitán de las cañas”*

Dedicatoria.

Esas maravillosas personas a las que les debo lo mejor de mí son: Mis padres por ser el motor impulsor de mi vida, de mis logros, de mis deseos de mirar siempre hacia adelante y de trazarme nuevas metas; por pensar en mí a todo momento; y en especial por recordarme que siempre estarán ahí, dispuestos a tenderme la mano y a darme fuerzas cuando siento que las adversidades me presionan.

Agradecimiento.

Me siento profundamente agradecida con todas las personas que se han cruzado en mi vida y me han inspirado, conmovido e iluminado con su presencia. También quisiera expresar mi reconocimiento y gratitud a las siguientes personas por su extraordinario apoyo y sus contribuciones en estos años de carrera:

A los extraordinarios seres humanos que forman mi familia: Mi valiente y hermosa madre que siempre ha estado a mi lado cuyo amor y apoyo no tiene límites y mi queridísimo padre por el amor incondicional. A mis hermanas, mi hermana Taymé por el amor que nos une y su valiosa ayuda durante todos estos años; mis queridos abuelos que se sienten muy orgullosos de mí, gracias por su amor y cariño; a mis tíos y primos por querer lo mejor para mí. A toda mi familia por acompañarme en este viaje y ser la joya más valiosa de mi vida, y con su presencia me impregnan de luz cada vez que respiro.

A mi novio que llegó a mi vida hace un año y en el momento que más lo necesitaba, me ha dado el apoyo y el amor que me han motivado a sentir que todo lo puedo lograr con dedicación y sacrificio; por ser tan especial conmigo.

Por compartir generosamente su sabiduría, divinidad y acompañarme en la creación de este Trabajo mis más especiales agradecimientos al Profesor Santiago Díaz.

A todos aquellos Profesores que he tenido durante estos años, a quienes les debo mi formación y superación.

Muchas Gracias a todos.

Resumen.

La presente investigación tiene como objetivo, evaluar mediante las principales variables de control, la eficiencia en las áreas de extracción y purificación en el Central Azucarero "Jesús Rabí"; durante 28 días del mes de febrero. Partiendo de una caracterización estadística de las principales variables operacionales y la realización de las cartas de control en las dos etapas, se determinaron las causas que producen violaciones en la disciplina tecnológica y su influencia sobre el proceso de producción de azúcar crudo. Con la aplicación de estas herramientas se demostró que las etapas se encontraron fuera de control estadístico. Se realizaron balances de masa con el objetivo de determinar los diferentes flujos que intervienen en las áreas, así como, los indicadores de eficiencia de producción para comprobar las pérdidas ocurridas. Las principales causas detectadas son la mala instrumentación, incumplimiento de las normas, falta de control del proceso y poca capacitación del personal. Además, se pudo detectar que por concepto de violación de la disciplina tecnológica se pierden 136 927.80 ton de azúcar que representa \$ 37 855 059.60 en el periodo analizado.

Abstract.

The present investigation has as objective, to evaluate by means of the main control variables, the efficiency in the extraction areas and purification in the Sugar Factory "Jesus Rabbi"; during 28 days of the month of February. Leaving of a statistical characterization of the main operational variables and the realization of the control letters in the two stages, the causes that produce violations were determined in the technological discipline and their influence on the process of production of raw sugar. With the application of these tools it was demonstrated that the stages were outside of statistical control. They were carried out balances of mass with the objective of determining the different flows that intervene in the areas, as well as, the indicators of production efficiency to check the lost ones happened. The main detected causes are the bad instrumentation, nonfulfillment of the norms, lack of control of the process and the personnel's little training. Also, you could detect that for concept of violation of the technological discipline you pierden 136 927.8 rhyme of sugar that represents \$37 855 059.60 in the analyzed period.

Índice.

INTRODUCCIÓN:	1
----------------------	----------

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.	3
--	----------

1.1: GENERALIDADES DE LAS ETAPAS DE EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA.	3
1.1.1: ETAPA DE EXTRACCIÓN O MOLIENDA.	3
1.1.2 ALGUNOS ASPECTOS RELACIONADOS AL PROCESO DE IMBIBICIÓN.	6
1.1.3: ETAPA DE PURIFICACIÓN.	8
1.1.4: PROCESO DE FILTRACIÓN.	11
1.2: VARIABLES DEL CONTROL DEL PROCESO Y SU REPERCUSIÓN EN EL TRABAJO DE LAS ETAPAS DE EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN.	13
1.2.1: REPERCUSIÓN DEL TRABAJO DE LA ETAPA DE EXTRACCIÓN.	15
1.2.2: REPERCUSIÓN DEL TRABAJO DE LA ETAPA DE PURIFICACIÓN.	17
1.2.3: IMPORTANCIA DEL CONTROL DEL PROCESO.	18
1.2.3.1: ELABORACIÓN DE CARTAS DE CONTROL.	19
1.2.3.2: INSTRUMENTACIÓN.	21
1.2.3.3: BALANCES DE MASA.	22
1.3: NORMALIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN.	22
1.3.1: NORMALIZACIÓN EN LA ETAPA DE EXTRACCIÓN.	22
1.3.2 NORMALIZACIÓN EN LA ETAPA DE PURIFICACIÓN.	25
1.3.3: LA SEPARACIÓN DE INSOLUBLES EN EL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	27
CONCLUSIONES PARCIALES DEL ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.	28

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.	29
--	-----------

2.1: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR CRUDO.	29
2.1.1: ETAPA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA.	30
2.1.2: ETAPA DE PURIFICACIÓN.	31
2.1.3: ETAPA DE CONCENTRACIÓN O EVAPORACIÓN.	31
2.1.4: ETAPA DE CRISTALIZACIÓN.	32
2.1.5: ETAPA DE CENTRIFUGACIÓN.	33
2.1.6: ETAPA DE GENERACIÓN DE VAPOR.	34
2.1.7: ETAPA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	34
2.2: SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS OBJETO DE ESTUDIO.	35
2.2.1: ÁREA DE EXTRACCIÓN.	35
2.2.2: ÁREA DE PURIFICACIÓN.	36
2.3: SELECCIÓN DE LAS VARIABLES PARA EL CONTROL DEL PROCESO.	36
2.3.1: METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA.	37
2.3.1: ELABORACIÓN DE CARTAS DE CONTROL.	38
2.3.1: OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES.	39
2.3.1.1: METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE LAS VARIABLES EN EL ÁREA DE EXTRACCIÓN.	40
2.3.1.2: METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO DE LAS VARIABLES EN EL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	40
2.4: BALANCES DE MASA.	41

2.4.1: BALANCES DE MASA EN EL ÁREA DE EXTRACCIÓN.	41
2.4.2: BALANCES DE MASA EN LA ETAPA DE PURIFICACIÓN.	42
2.4.3: METODOLOGÍA Y EXPRESIONES PARA EVALUAR LA EFICIENCIA EN LA SEPARACIÓN DE INSOLUBLES EN EL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	47
2.5: OTROS INDICADORES DE VALORACIÓN DEL PROCESO.	47
2.6: VALORACIÓN ECONÓMICA	48
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.	49

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. **50**

3.1: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES OPERACIONALES DE LAS ETAPAS DE EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN.	50
3.1.1: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN.	50
3.1.2: ANÁLISIS DE LAS VARIABLES TECNOLÓGICAS DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN.	51
3.2: EVALUACIÓN DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN.	59
3.2.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS BALANCES DE MASA.	60
3.3: ANÁLISIS DEL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	61
3.3.1: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES DEL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	61
3.3.2: ANÁLISIS DE LAS VARIABLES TECNOLÓGICAS EN EL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	62
3.4 EVALUACIÓN DEL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	66
3.4.1: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS BALANCES DE MASA.	68
3.4.2: INDICADORES DE EFICIENCIA DEL ÁREA DE PURIFICACIÓN.	68
3.4.3: ESTADO DE LA INSTRUMENTACIÓN EN LAS ÁREAS DE EXTRACCIÓN Y PURIFICACIÓN.	69
3.5: VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.	70
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.	71

CONCLUSIONES. **72**

RECOMENDACIONES. **73**

BIBLIOGRAFÍA. **74**

ANEXOS. **80**

Introducción:

La industria azucarera “Jesús Rabí” perteneciente al Grupo Empresarial AZCUBA, se encuentra ubicada en la parte más oriental del municipio de Calimete, es una industria que tiene como misión fundamental producir azúcar y derivados de la caña de azúcar, energía eléctrica y alimento animal con calidad y costos competitivos, aplicando la ciencia, la técnica y protegiendo el medio ambiente.

Para garantizar la calidad óptima de la producción existe un sistema de control y aseguramiento de la calidad amparado por el chequeo de todos los procedimientos, instrucciones de trabajo, guías de operación y limpieza de los equipos. Igualmente, el proceso productivo se sustenta en la garantía y calidad de la materia prima, el aseguramiento del equipamiento tecnológico y los recursos humanos.

El flujo de producción de la industria azucarera está relacionado con la fase fundamental del proceso productivo, las corrientes de materiales y su transformación desde que entra la materia prima (caña de azúcar) hasta que se obtiene el producto final (el azúcar). Este consta de varias etapas bien definidas: preparación de la caña, extracción, purificación, concentración, cristalización y la etapa de centrifugación.

El control del proceso es indispensable para obtener el azúcar con la calidad requerida y el mínimo de pérdidas. Siendo esta una industria muy compleja debido a la cantidad de operaciones unitarias que ocurren en ella, mantener un control estricto en cada una de las etapas es primordial, pues garantiza el éxito de este proceso industrial.

Las etapas de extracción y purificación son de vital importancia para el proceso de producción de azúcar crudo y en gran medida el resultado final del proceso depende del éxito tecnológico en estas etapas, sin embargo, la falta de instrumentación no permite medir diversos flujos, vinculados a la misma, afectando la calidad operativa y el control técnico de estas etapas.

Si se tiene en cuenta lo antes mencionado y que en estas etapas existen variables de fácil medición, pero que se relacionan con variables complejas que definen su eficiencia, puede comprenderse la importancia de contar con un

estudio del comportamiento de estas variables y de su interrelación, así como su incidencia en la eficiencia de estas etapas, lo cual permitirá a los tecnólogos de la industria, tomar medidas en un corto tiempo, que favorezcan a todo el proceso productivo.

A partir de los planteamientos anteriores, se detecta como **problema científico** de la investigación:

¿Cómo determinar el comportamiento de la disciplina tecnológica en las áreas de extracción y purificación, así como su influencia en el proceso de producción de azúcar crudo, en el Central Azucarero “Jesús Rabí”?

Como posible solución a dicho problema se plantea la siguiente **hipótesis** de trabajo:

Si se realiza una evaluación del comportamiento de las principales variables de control en las etapas de extracción y purificación se podrá definir el comportamiento de la disciplina tecnológica y su repercusión en el proceso.

Para dar cumplimiento a la hipótesis, se ha trazado el siguiente **objetivo general**:

Evaluar mediante las principales variables de control la eficiencia en las áreas de extracción y purificación en el Central Azucarero “Jesús Rabí”.

Para darle cumplimiento al objetivo propuesto anteriormente, se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- 1- Caracterizar el proceso de producción del central objeto de estudio y seleccionar las variables a estudiar.
- 2- Evaluar las variables de control de las etapas de extracción y purificación.
- 3- Valorar desde el punto de vista económico el manejo de las principales variables de los procesos de extracción y purificación.
- 4- Evaluar la eficiencia en la separación de insolubles de los principales equipos.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico.

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos relacionados con el tema de investigación, para ello se utilizan diferentes fuentes bibliográficas. Se abordan como temáticas fundamentales: el proceso de producción de azúcar crudo, las etapas de extracción y purificación en la industria azucarera y los principales factores que afectan a este proceso en las etapas a controlar en este trabajo.

El estudio de la disciplina tecnológica es muy importante en el buen desempeño de cualquier industria de procesos químicos. Esta trae asociada varios factores fundamentales que son de interés conocerlos y controlarlos, tales como: normalización, control del proceso, estado de la instrumentación y mantenimiento. Entre los aspectos que se ven afectados directamente por la violación de esta se encuentran: la economía, la seguridad del proceso, la calidad del producto y el medio ambiente. La industria azucarera es una industria carente de buena disciplina tecnológica.

Además, se analizan las variables fundamentales que se miden para el control del proceso, así como su repercusión en la calidad de las demás etapas para alcanzar la calidad y eficiencia requeridas. También se tratan las diferentes normalizaciones de las variables que serán objeto de estudio en todo el trabajo.

1.1: Generalidades de las etapas de extracción y purificación en el proceso de producción de azúcar de caña.

En este epígrafe se describen las etapas de extracción y purificación de la caña de azúcar, según refieren diferentes autores.

1.1.1: Etapa de extracción o molienda.

El objetivo de la molienda de caña es separar el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, constituida principalmente por fibra. El término de extracción se utiliza para expresar el porcentaje de sacarosa que ha sido extraído de la caña en los molinos y es igual a la sacarosa en el jugo crudo o diluido, expresada como porcentaje de la sacarosa en caña. (Rein, 2012)

En los molinos la caña es exprimida utilizando elevadas presiones entre pares de mazas o rodillos consecutivos, estos están diseñados para extraer tanto jugo (agua disponible + sacarosa + no azúcares) como sea posible de la fibra insoluble. Al residuo de la caña después que se le ha extraído el jugo se le denomina bagazo.

Aun cuando el bagazo se somete a presiones considerables y repetidas no cede jamás todo el jugo que contiene, conserva siempre una fracción importante del jugo que representa, aproximadamente, la mitad de su peso. Para extraer la mayor cantidad posible del azúcar contenido en ese jugo debe recurrirse a la “imbibición”.

Para obtener alta extracción es necesario aplicar presión a la masa superior de cada molino, el propósito del sistema de presión es someter el colchón de caña o bagazo a una presión constante predeterminada por el central, ya que esta puede variar ampliamente para cada fábrica, tipo de molinos, fibra en caña, ritmo de molienda; pudiendo ser desde **150** hasta **550** toneladas y dependiendo de la posición del molino en el tándem. La presión se expresa en toneladas o por el valor total de la presión ejercida sobre la masa superior y relacionada con las dimensiones del eje de la masa (largo x diámetro), puede ser en psi o kgf/cm².(Aguilar, 2015)

Del **60** al **70 %** del jugo es extraído por la primera presión, por lo que en términos generales puede señalarse que una extracción eficiente en un tándem, depende en gran parte de la operación eficiente del primer molino o desmenuzadora. Subsecuentemente el flujo de jugo disminuye, y el jugo remanente en el bagazo después del primer molino, tiene que ser extraído por una combinación de lixiviación y presiones periódicas en los molinos restantes. Este método de extracción por lixiviación es llamado maceración o imbibición. (Arca, *et al* 1988)

Otra definición para la etapa de extracción es la brindada por Rosero y Ramírez (2009) donde plantean que la estación de extracción consiste generalmente de 5 o 6 molinos en cascada. Cada molino consta de 4 mazas (superior, cañera, bagacera y un alimentador). La caña preparada por las picadoras y/o desfibradoras se alimenta al primer molino por medio de un transportador de velocidad variable. El bagazo resultante del primer molino se alimenta al

Capítulo 1

siguiente por medio de un transportador que opera a velocidad fija y así sucesivamente hasta el sexto. El bagazo que sale del último molino se lleva a calderas como combustible. A la entrada del último molino se adiciona agua de imbibición para diluir el jugo y extraer la sacarosa que contiene el material fibroso; el contenido de jugo que resulta de cada extracción, se envía al molino anterior y así sucesivamente hasta el segundo. El contenido de jugo extraído por el primero y segundo molino es enviado a la etapa de proceso.

El proceso de molienda incluye la combinación de la imbibición y la extracción como procesos que se combinan para extraer el jugo en el tándem (Quintero y Peralta, 2005).

Según, (Morales, *et al* 2010) el proceso de extracción del jugo comienza con la preparación de la caña. En esta etapa se busca romper y desgarrar los tallos de la caña con el fin de prepararla para el proceso de molienda. Para ello usan diferentes tipos de máquinas; entre las que se encuentran: picadoras o cuchillas, desfibradoras o desmenuzadoras. Luego de que la caña ha sido preparada es llevada al proceso de molienda, esta etapa busca separar los dos constituyentes principales de la caña, el jugo y la fibra.

El tren de molinos está constituido por varias unidades instaladas en serie. La cantidad de molinos dependerá de la razón de molienda diaria y de la magnitud de la preparación previa que tenga la caña. Un molino consiste esencialmente de tres cilindros horizontales llamados mazas que exprimen la caña que pasa entre ellos para extraerles el jugo. Las mazas se colocan formando un triángulo dentro de una estructura de acero llamada virgen. La maza colocada en la parte superior del triángulo se denomina “superior” y las otras dos, que están situadas en un plano inferior, “cañera” y “bagacera”. Las mazas constan de un eje central de acero, el guijo, sobre el que se prensa un tambor de hierro fundido. El proceso de extracción de jugo y de agotamiento del contenido de azúcar del bagazo en tránsito, se consigue triturando la caña entre las mazas, con la ayuda de la presión hidráulica y del sistema de imbibición. Dentro del molino el bagazo pasa sobre un puente, la cuchilla central, en su paso desde la compresión entre las mazas superior y cañera hasta la compresión entre la maza superior y bagacera.

Otros componentes son el sistema para el movimiento de las mazas y el sistema de lubricación (Manual de Operaciones, 2013).

En toda la bibliografía citada anteriormente los autores coinciden en el uso del agua de imbibición para favorecer la extracción de sacarosa de la caña de azúcar, debido a que con simple presión no es posible extraer todo el jugo que contiene la caña y con este la sacarosa.

1.1.2 Algunos aspectos relacionados al proceso de imbibición.

Cuando se trabaja a presión seca, el límite de extracción se obtiene rápidamente: después de la desmenuzadora y el primer molino la humedad del bagazo se ha reducido ya cerca del **60 %**. Después del segundo molino la humedad se aproxima a **50 %**. Del tercero en adelante no baja más allá de **45 %**: puede considerarse que se ha obtenido por simple presión, la máxima extracción posible. Si en este momento se agrega agua uniformemente, ésta se distribuye dentro del bagazo y diluye al jugo que contiene. El molino siguiente volvería a llevar al bagazo a la **humedad límite, es decir, alrededor de 45 %**. Sin embargo, esta humedad ya no estará constituida por jugo absoluto sino por jugo diluido: de esta forma se habrá extraído azúcar. (Ramírez y Caín, 2018)

La adición de un porcentaje de agua de imbibición delante de cada unidad de molienda es a veces denominada “imbibición simple”. La diferencia de Brix entre la imbibición y el jugo en el bagazo alimentado se maximiza con esta práctica, pero la cantidad de agua que puede aplicarse por etapa de extracción es restringida severamente. Por esta razón, la gran mayoría de las industrias aplican toda la imbibición antes del último molino. (Rein, 2012)

El proceso de imbibición busca reemplazar el jugo contenido en el bagazo por agua, esto debido a que aun cuando el bagazo sea sometido a altas y repetidas presiones no es posible extraer todo el jugo contenido.

Para (Morales, *et al* 2010) en el proceso de imbibición se dirige una corriente de agua o jugo entre los **60 – 85 °C**, sobre el bagazo que está entrando al molino. Este proceso eleva la dilución del jugo contenido en este bagazo y de esta manera mejora la extracción en el siguiente molino. Se pueden usar diferentes esquemas de imbibición. La imbibición puede ser simple, agregando agua al

bagazo que está ingresando a cada uno de los molinos o compuesta, en esta se agrega agua al último molino, el jugo obtenido en este se devuelve al penúltimo y este a su vez al anterior y así sucesivamente.

Arca, *et al* (1988) plantea que el sistema de imbibición compuesta es el que se aplica en los casos de cuatro molinos o más en el tándem. En este sistema se aplica agua al bagazo que va al último molino, y el jugo extraído del último molino se aplica al bagazo entrando al molino anterior, y así sucesivamente, dependiendo del número de molinos. En algunas instalaciones se aplica agua en los dos últimos molinos, y en otros hasta en más de los dos últimos.

A partir de caña razonablemente bien preparada es posible extraer normalmente entre **60 y 75 %** de la sacarosa utilizando un primer molino convencional. Si la caña se pasa entonces a un segundo molino, es poco el jugo que ha quedado libre en el bagazo y debido a esto la recuperación de sacarosa será mucho menor. Para permitir a los molinos siguientes extraer mayor cantidad de sacarosa se añade al bagazo agua adicional. Este proceso se denomina imbibición. El agua añadida en la imbibición se mezcla con el jugo que queda en la caña, diluyéndolo y constituyendo un material a partir del cual los molinos pueden extraer más. (Rein, 2007)

La aplicación eficiente del sistema de imbibición es tan importante para la extracción del tándem como la acción de fuertes presiones en los dos primeros molinos. A partir del segundo molino, si se aplicara sólo presión hidráulica sin imbibición, se notará que no se gana en extracción porque el bagazo retiene una cantidad de jugo aproximadamente igual al peso de la fibra, y es necesario diluir por lixiviación el que aún permanece en la misma con el fin de continuar reduciendo el contenido de sacarosa en el bagazo (Manual de Operaciones, 2013).

La temperatura del agua de imbibición, decisiva en una mayor o menor extracción de sacarosa en el tándem, influye en la temperatura del jugo mezclado y otros jugos. También influye en la del bagazo, pues a mayor temperatura mayor auto evaporación y por ende un poco menos de humedad.

La cantidad de agua de imbibición, que se añade delante del último molino, influye decisivamente en la concentración de sólidos solubles totales (Brix) pues

una mayor cantidad de agua de imbibición da lugar a un aumento del flujo másico de jugo mezclado – los aumentos del flujo másico del jugo mezclado aumentan el del jugo (alcalizado más filtrados).

1.1.3: Etapa de purificación.

Esta etapa tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad de impurezas del jugo mezclado; mediante la sedimentación se pretende eliminar la materia fina y coloidal en suspensión que contiene el jugo. Dentro del proceso de purificación se encuentra los subprocesos de: alcalización, calentamiento, clarificación o sedimentación y filtración de los lodos.

La clarificación por defecación usualmente se realiza mediante la combinación de: adición de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , para elevar el valor del pH desde 5,3 hasta **7,2-8,0**. El Ca(OH)_2 puede estar en forma de lechada de cal o como sacarato mezclando cal-jugo o cal-meladura.

Para controlar la alcalización del jugo se mide el pH, el cual debe ser superior a **7,5**, logrando una buena clarificación para valores de pH entre **8** y **9**, (Cruz, 2007).

Según (Rein, 2012) el tratamiento utilizando cal en solución con agua o con jugo/meladura (sacarato) continúa siendo el método básico de clarificación, normalmente denominado defecación.

Objetivos de la clarificación del jugo:

-) Formar flóculos que atrapan toda la materia suspendida que así puede sedimentarse a una velocidad satisfactoria.
-) Proporcionar las condiciones de temperatura, pH y concentración de iones que maximizan la precipitación de impurezas sólidas del jugo.
-) Producir jugo clarificado con mínima turbiedad, mínimo color y bajo contenido de calcio.
-) Producir un lodo sedimentado que sea apto para su posterior procesamiento.
-) Efectuar todo lo anterior al menor costo posible, con mínimo tiempo de residencia, mínima pérdida de sacarosa (por inversión y otros mecanismos) y mínima formación de color en el jugo.

- J) Obtener jugo clarificado con un pH que minimice la inversión en la subsecuente operación de evaporación.

El lodo floculado se sedimenta durante el proceso de clarificación sobre la capa del fondo y es removido a una tasa de flujo estable. Subsecuentemente el lodo tiene que ser filtrado para poder recuperar el jugo del suelo y de los sólidos de lodo, básicamente mediante la adición de finas partículas de bagazo, conocidas como bagacillo, como medio filtrante. El jugo filtrado se retorna al sistema de calentamiento del jugo.

Morales, *et al* (2010) plantea que, en la etapa de clarificación, se busca eliminar las impurezas solubles e insolubles presentes en el jugo. Así mismo se eleva el pH del jugo, el cual al salir de la molienda puede estar entre **4,9 -5,7**, la acidez en el jugo favorece la reducción de la sacarosa. En este proceso se agrega una lechada de cal para elevar el pH. Posteriormente el jugo se calienta en intercambiadores de calor hasta alcanzar temperaturas cercanas a los **105 °C**. A continuación, se adiciona floculante antes de que el jugo sea alimentado a los clarificadores. En estos se formará un precipitado que contiene sales insolubles, fosfatos de calcio, ceras y gomas. Este precipitado se filtra obteniéndose la cachaza, subproducto rico en minerales, el cual se usa como fertilizante.

Otra definición para la etapa de clarificación es la brindada por (Ordóñez, 2004) donde plantea que el objeto de la misma es remover algunas impurezas insolubles y las que se encuentran disueltas. El jugo de color verde oscuro procedente de los molinos es ácido y turbio. El proceso de clarificación emplea en forma universal cal, calor y agentes clarificantes. El principal objetivo de la clarificación es estabilizar el pH del jugo para hacer mínima la pérdida de sacarosa por inversión y mejorar el proceso de cristalización, otro objetivo es eliminar el material insoluble suspendido o acarreado en el jugo (fibra, residuos de suelo, sólidos en suspensión y coloides principalmente) obteniendo un jugo claro, transparente, brillante, exento de toda materia que no sea azúcar, que pueda evitar la cristalización. El pH óptimo al que se debe llevar el jugo mediante la alcalinización depende de muchas condiciones y varía según la

localización de la fábrica, la variedad y la madurez de la caña, la capacidad del equipo de decantación y otras condiciones locales.

Para la clarificación se utiliza lechada de cal, que neutraliza la acidez natural del guarapo, formando sales insolubles de calcio, en su mayor parte fosfato de calcio.

La clarificación separa el jugo en dos porciones, el jugo clarificado y los precipitados sedimentables, espumas y lodos. El jugo clarificado, que consiste en el **80 a 90 %** del jugo original, casi invariablemente pasa a los evaporadores sin más tratamiento. Las espumas y lodos se filtran.

Según (Herrera,2011) la clarificación de 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, ya que estas son precursoras de color y turbiedad, además que disminuyen la eficiencia de la extracción de sacarosa. Esta remoción se lleva a cabo efectuando las siguientes operaciones: calentamiento primario, alcalinización, calentamiento secundario, clarificación, separación de cachaza.

(Caballero, 2013).La clarificación es un proceso empleado para eliminar la máxima cantidad de impurezas que posee el jugo, separando los lodos formados por las reacciones de la cal y el calentamiento secundario en sedimentadores continuos, para aumentar la precipitación de lodos se utiliza como ayuda los floculantes. Para efectuar la clarificación se necesita de: cal, temperatura y sedimentación- decantación.

El precipitado formado en el jugo alcalizado es de composición compleja, tiene una parte más ligera y otra más pesada que el jugo, y está formado por los productos de las reacciones con la cal y el calentamiento secundario.

Para separar los lodos, denominados cachaza del jugo claro, se utilizan sedimentadores continuos llamados clarificadores. Debido a que el jugo alcalinado en estos equipos se encuentra a temperatura de ebullición, el tiempo de residencia que permita la separación de la cachaza y el jugo debe ser el menor posible, para evitar pérdidas por inversión. Para aumentar la velocidad de sedimentación de cachaza, se utilizan los floculantes.

Para (Marín, 2012) con la clarificación de jugo se pretende principalmente:

Obtener un pH de jugo claro adecuado para evitar la inversión de la sacarosa o descomposición de las sustancias que puedan producir color.

Formar flóculos que atrapen la materia suspendida, para que pueda ser precipitada en un rango satisfactorio.

Lograr precipitaciones y coagulaciones tan completas como sean posibles.

Que la velocidad de asentamiento sea rápida para minimizar tiempos de residencia en los clarificadores o pérdidas de sacarosa por inversión u otros mecanismos y obtener lodos lo más compactos posibles.

Calentamiento, por etapas, hasta el punto de ebullición y uso de un tanque flash de despresurización y purga rápida que permite remover el aire atrapado o disuelto en el jugo.

El jugo de caña o guarapo es purificado con procesos químicos evitando su fermentación y descomposición. De la purificación se obtiene la cachaza que es un abono muy utilizado en la agricultura, actualmente tiene usos como producto de incorporación al suelo, medio de cultivo en viveros frutales y forestales. Este jugo es pesado para luego pasar a los procesos de calentamiento, clarificación y filtración, lo que permite separar los materiales diferentes a la sacarosa que se encuentran en el jugo (Díaz y Portocarrero, 2002).

1.1.4: Proceso de filtración.

La decantación separa a los jugos tratados en dos partes: el jugo claro que sube a la superficie, la cachaza, que se reúne en el fondo.

El jugo claro va a la fabricación, es decir, generalmente a la evaporación. La cachaza debe filtrarse a fin de separar del jugo el precipitado que contiene junto con las sales insolubles que se han formado y el bagazo fino, que se arrastró. La filtración es una operación a veces delicada y difícil de manejar. Para poder hacerla, con las mejores probabilidades de éxito es necesario observar ciertas reglas:

Temperatura. La viscosidad del jugo, y, sobre todo, la de las gomas decrece a medida que la temperatura aumenta. Por esta razón es conveniente filtrar el jugo a alta temperatura. En lo posible debe operarse arriba de **80 °C**.

Reacción. Los jugos alcalinos filtran mejor que los jugos ácidos o neutros.

Por esta razón generalmente se agrega cal a las cachazas, antes de enviarlas a la filtración. El pH se lleva hasta **8 u 8,5**. Es mejor no pasar de 8,5 para no emplear inútilmente un exceso de cal, que también aumenta las incrustaciones en el múltiple efecto. La torta que se obtiene tiene un buen aspecto, seca y porosa; contiene, sin embargo, del **75 al 80 %** de agua (Hugot, 1986).

Por la necesidad de agregar bagacillo a la cachaza, para facilitar la filtración deben calcularse aproximadamente **4 kg de torta por 100 kg de caña**; esta cantidad, mayor que la habitual (que es de unos **2 kg**) se debe en parte a la humedad y en parte al bagacillo que contiene.

La torta contiene del **0,2 al 1,5 %** de azúcar, en promedio del **0,8 al 1 %**. Esta cantidad corresponde a una pérdida de azúcar de alrededor de 0,1 a 0,4 de azúcar en caña.

Lavados. La cantidad de agua del lavado que pasa en el jugo claro sólo representa una pequeña fracción del agua que llega al filtro, alrededor del **20 al 25 %**. La mayor parte permanece en la torta. Entonces es necesario determinar la cantidad de agua que debe emplearse en el lavado de acuerdo con la dilución del filtrado claro y no según la cantidad de agua por sí misma.

La eficiencia del lavado tiene mayor importancia que la cantidad de agua que se emplea (Hugot, 1986).

Según (Herrera, 2011) la cachaza retirada de los clarificadores, que contiene del **40 – 60 %** de jugo, es bombeada a un mezclador donde se le adiciona bagacillo que ayuda a formar una torta de mayor volumen y porosidad que permite una mejor filtración. Esta mezcla es bombeada a unos filtros rotatorios al vacío, donde se extrae el jugo, que es retornado al tanque de jugo alcalizado, mientras la cachaza, con una humedad del **70 %** y un contenido de sacarosa entre **(1,0 – 1,2 %)**, es conducida por un transportador sinfín y por un transportador de banda a tolvas de donde es retirada por góndolas, que la

transportan al campo donde es utilizada como abono. La cachaza que sale del ingenio es pesada para cuantificar las pérdidas de sacarosa en esta parte del proceso.

El filtro consiste en un tambor rotatorio cubierto de láminas de metal perforado, que se zambulle en un baño de cachaza. A medida que gira se aplica vacío (**14 pulgadas de Hg**) mediante bombas de vacío conectadas a un condensador que utiliza agua para retirar los vapores del sistema a través de columnas barométricas con sello líquido. Este vacío 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. (Morejón, 2013)

1.2: Variables del control del proceso y su repercusión en el trabajo de las etapas de extracción y purificación.

Existen múltiples términos azucareros cuyos significados aparecen en diversas fuentes bibliográficas.

Caña Verde: los elementos que conforman la caña verde limpia recién cortada son muy diversos y varían de forma apreciable con: las condiciones climáticas (lluvia, frío, humedad relativa, etc.), el cultivo (riego, fertilización, etc.), edad en el momento de la cosecha (en Cuba: 12 -15 meses), variedad (Jaronú, Mayarí, Canal Point, Barbados, etc.), cepa (caña planta, retoños: 1 a 5 cortes) y madurez (mayor o menor contenido de sacarosa). (Valdez, 2014)

Caña Industrial: la caña que llega a la fábrica se denomina “caña industrial” y es una mezcla de cañas de diferentes variedades, cepas, edades y nivel de madurez. En la composición de la caña industrial, que cuando se corta empieza a deteriorarse y a perder agua, se incluyen las impurezas incorporadas en la cosecha y traslado al ingenio. Son mayormente hojas secas y verdes, cogollos, penachos y tierra. De ahí que la composición de la “caña industrial” es muy diferente a la del tallo de caña verde limpia. Su calidad puede variar mucho dependiendo de la efectividad de la cosecha. Esta a su vez depende de: a) el tiempo que media entre el corte y la molienda que debe ser el mínimo posible; pues mientras más tiempo lleve de cortada más se deteriora lo que se hace

cada vez más difícil la obtención de azúcar de buena calidad y b) la cantidad de materias extrañas incorporadas en el corte, alza y transportación, cuyos componentes principales son fibra y no azúcares. (Valdez, 2014)

La caña de azúcar es una fuente renovable de energía, alimento y otros productos, empleada desde hace siglos. Las posibilidades tecnológicas disponibles o en proceso de desarrollo tecnológico hacen posible que esta biomasa renovable puede ser más eficientemente utilizada, especialmente para generar electricidad. La caña entrega a la industria azucarera, agua y combustible renovable más que suficiente para satisfacer la demanda de potencia y calor del proceso de extracción de la sacarosa, su posterior cristalización y centrifugación en forma de azúcar comercial. También permite producir cantidades apreciables de electricidad útil no solo para el auto abastecimiento eléctrico del ingenio sino también para entregar a la red nacional. (Morales, 2016)

Materias extrañas: Se define como todo aquello que no es el tallo sano de la caña de azúcar, tales como: la paja, el cogollo, retoños, tallos enfermos o deteriorados, así como, la tierra y otros materiales. La presencia de estas clasifica como no azúcares, se consideran en términos de eficiencia industrial muy negativas y se traducen además en grandes pérdidas económicas para la industria. (Valdez, 2014)

Las formas más comunes de medir la composición y concentración de los jugos y otras corrientes azucaradas son el Brix, el Pol y la Pureza.

El "Brix", es el por ciento másico de sólidos solubles totales (SST) en un producto azucarado. La forma más sencilla de medir los grados Brix es con un areómetro, que puede también estar calibrado en grados Baumé. Para más exactitud se usa un refractómetro y si la medición debe tener mayor precisión se miden los sólidos solubles totales por desecación. Es conveniente precisar que el Brix no es una medida de la viscosidad de la solución.

El "Pol", indica el contenido aparente de sacarosa en un producto azucarado. Para las soluciones puras de sacarosa el "Pol" equivale al % másico de sacarosa real no siendo así para las soluciones industriales.

La “Pureza Real” es la proporción de sacarosa en los sólidos solubles totales de la sustancia azucarada. Por tanto, una solución con **85** de Pureza real contiene **85 %** de sacarosa y **15 %** de otros sólidos solubles no sacarosa. El agua que contiene la solución no se tiene en cuenta en este término, o sea es un % sobre base libre de agua. La “Pureza Aparente” es la relación entre el Pol y el Brix aerométrico y es la más usada en el control del proceso.

Según la bibliografía consultada en las etapas de extracción y purificación se tienen en cuenta las variables operacionales, ya que estas son de gran importancia para el control del proceso.

El control del proceso en las áreas de extracción y purificación es de vital importancia para toda la industria en general. Una buena extracción en el tándem y un proceso de purificación con el mínimo de recursos empleados y menores pérdidas trae consigo una mayor eficiencia económica y mayor calidad del producto final.

1.2.1: Repercusión del trabajo de la etapa de extracción.

La Planta de Moledora es el área del Central donde se muele la caña procedente del basculador. De esta operación se obtiene el jugo que se envía al proceso y el bagazo que sirve como combustible en las calderas para la generación del vapor y como materia prima para los derivados. Su operación es de suma importancia porque en ella se pueden producir una de las mayores pérdidas de azúcar de la fábrica y consume del **30** al **50 %** de la energía que se produce (Manual de Operaciones, 2013).

Operar correctamente el área de Planta Moledora es una tarea decisiva para la eficiencia de un central azucarero, porque se pueden presentar los siguientes inconvenientes:

-) Insuficiente extracción de la sacarosa contenida en la caña.
-) Mala calidad del bagazo que se entrega como combustible.
-) Alto consumo de energía.

La influencia del tándem es muy marcada en otras áreas. Si no se suministra el jugo en cantidad y calidad requeridas se afectan la producción y la calidad del azúcar. Si no se logran humedades en el bagazo de **50 %** o inferiores,

disminuye la generación del vapor, con perjuicio para la fábrica y para la producción de energía. Si no se tiene un control estricto del caudal y de la temperatura del agua de imbibición, se afectan la extracción de sacarosa, la clarificación o la capacidad de evaporación. Si consume mucha energía, resta posibilidades a la planta eléctrica de destinarla al consumo social. Esto significa que no se puede considerar a la Planta Moledora aisladamente, sino como una parte integral de la fábrica, y cualquier alteración en su operación repercute en todo el proceso (Manual de Operaciones, 2013).

Gómez, *et al* (2006); Vélez y Jáuregui (2006) coinciden en que el consumidor principal de energía en un Central Azucarero es el tándem. El rendimiento en esta área puede ser decisivo, lograr una buena extracción con una demanda racional de potencia, decide definitivamente la eficiencia de la fábrica de azúcar. Según (Pérez, 2009) la cantidad de agua de imbibición, que se añade delante del último molino, influye decisivamente en la concentración de sólidos solubles totales (Brix) pues una mayor cantidad de agua de imbibición da lugar a un aumento del flujo másico de jugo mezclado. Los aumentos del flujo másico del jugo mezclado aumentan el del jugo (alcalizado más filtrados) que pasa por los calentadores correspondientes y el del jugo claro. La temperatura del agua de imbibición, decisiva en una mayor o menor extracción de sacarosa en el tándem, influye en la temperatura del jugo mezclado y otros jugos. También influye en la del bagazo, pues a mayor temperatura mayor auto evaporación y por ende un poco menos de humedad.

Respecto a la humedad del bagazo (Hugot, 1986) refiere que esta aumenta ligeramente con la intensidad de la imbibición de ahí la gran importancia que tiene tener un buen control del agua de imbibición que se va añadir para obtener mayores rendimientos en la generación de vapor.

Sobre la eficiencia térmica (García, 2014) plantea que entre los parámetros que inciden mayormente sobre esta, están la imbibición, el Brix de los líquidos alimentados a los tachos y la humedad del bagazo. También refiere que el agua de imbibición, que es de gran importancia para una buena extracción, significa al mismo tiempo, agua que es necesaria evaporar en el proceso de evaporación. Sobre la repercusión de las pérdidas de sacarosa (Quintero y

Peralta, 2005) plantean que con la disminución de agua de imbibición se observa que las extracciones de sólidos solubles y de jugo disminuyen, también se observa que las pérdidas de Pol en el tándem se elevan.

En cuanto a las pérdidas de sacarosa en bagazo (Zepeda, 2012) destaca que dependen de varios factores entre los cuales están la preparación de la caña, la uniformidad del colchón de caña durante la molienda, los ajustes de los molinos, la presión hidráulica y estado físico de las masas de los molinos, la temperatura y flujo de agua de imbibición, el proceso de maceración, entre otros.

1.2.2: Repercusión del trabajo de la etapa de purificación.

La pérdida en cachaza es la que se produce por el arrastre de sacarosa en los lodos resultantes de la filtración de los sólidos sedimentables del proceso de clarificación del jugo. Ésta pérdida depende de los siguientes factores: la eficiencia del proceso de clarificación, estado de las telas de los filtros de cachaza, presión del agua de lavado de los lodos, la velocidad de rotación de los filtros, el porcentaje de bagacillo adicionado a la cachaza, las presiones de bajo y alto vacío, y la compresibilidad de la torta de cachaza (Manual de Operaciones, 2013).

Las pérdidas de sacarosa pueden estar dadas por:

-) El incremento de temperatura del jugo, lo cual acelera las reacciones de descomposición de la sacarosa y de los azúcares reductores formando productos coloreados. Se ha comprobado que una elevación de 10°C en la temperatura provoca un incremento de aproximadamente 3 veces en la velocidad de inversión de la sacarosa. Todas las operaciones de calentamiento llevadas a cabo durante esta etapa del proceso implican la aceleración de las reacciones de inversión de sacarosa.
-) El tanque flash donde bajo ciertas condiciones es posible la generación de pérdidas de sacarosa por sobrecalentamiento del jugo o una elevación incontrolada del nivel del tanque lo cual provoca arrastre de jugo hacia la atmósfera y posibles derrames por la abertura superior del tanque.

- J) La filtración de la torta de cachaza en los filtros al vacío, permaneciendo en ésta todavía cierta cantidad de sacarosa la cual posee una concentración inferior a **2 % de Pol** que se pierde en la cachaza enviada hacia los campos de cultivo (Zepeda, 2012).

En la estación de filtros de cachaza se lleva a cabo el tratamiento de los lodos del clarificador con el objetivo de extraerles la mayor proporción de la sacarosa que contienen y completar así la purificación de jugos de caña. Esta operación de filtración si no se lleva a cabo en un ambiente de disciplina tecnológica puede dar lugar a grandes pérdidas directas por el elevado contenido de azúcar en la torta y por las que produce al reciclar al proceso grandes proporciones de no azúcares que son causantes de los elevados volúmenes (Manual de Operaciones, 2013).

1.2.3: Importancia del Control del Proceso.

El control de la calidad del proceso utiliza la inspección del producto mientras se está produciendo, tomándose muestreos periódicos de la salida del proceso de producción. Si después de la inspección de la muestra hay razones para creer que las características de calidad del proceso han cambiado, se detiene el mismo y se realiza una búsqueda para identificar la causa posible. ***El objetivo del control de proceso es encontrar su rango de variación natural y asegurar que la producción permanezca dentro de ese rango.*** Para cualquier proceso de producción el control químico es fundamental, observando el comportamiento de sus variables básicas para el análisis de los diferentes problemas y corregirlos inmediatamente. En los últimos años se ha visto la necesidad de fortalecer el trabajo de control e integrarlo a un sistema interactivo de acción rápida para corregir los problemas de la producción, evitando que se afecte la calidad del producto final.

El control de las variables a valorar tienen como objetivo asegurar la base estadística informativa con la confiabilidad requerida sobre los parámetros que se llevan al esquema de control de la producción, proporcionar cifras que permitan localizar, cuantificar y erradicar pérdidas en la producción, así como acumular datos para valorar el trabajo de la empresa.

El proceso de producción para la obtención del azúcar de caña se puede clasificar como complejo por la gran cantidad de operaciones que encierra en diferentes etapas en las que el jugo sufre varias transformaciones físico-químicas hasta la obtención del producto final. La determinación de los datos en cada punto crítico es fundamental para la aplicación y uso de herramientas de calidad. Los datos de control obtenidos durante cada etapa del proceso son de vital importancia para la toma de decisiones tecnológicas, las cuales, en muchos casos, deben ser tomadas en etapas subsiguientes del proceso y en áreas geográficamente distantes del lugar donde se genera el resultado (Rodríguez, *et al*, 2007).

1.2.3.1: Elaboración de cartas de control.

(Woodall, 2016). Las cartas de control son gráficos cronológicos en los cuales se puede observar y analizar el comportamiento de una variable en un período determinado, donde se perciben los límites y se distinguen sus variaciones. Su utilización eficaz permite la detención oportuna de anomalías en el proceso, así como la prevención de futuros problemas. Existen diferentes gráficas de control en función de la variable a observar y del proceso a controlar. El proceso a controlar puede depender de una variable o de características llamadas atributos.

En Control de Calidad mediante el término variable se designa a cualquier característica de calidad “medible” tal como una longitud, peso, temperatura, etc.

Mientras que se denomina atributo a las características de calidad que no son medibles y que presentan diferentes estados tales como conforme y disconforme o defectuoso y no defectuoso. Según sea el tipo de la característica de calidad a controlar así será el correspondiente tipo de Gráfico de Control a obtener:

- Cartas de control por variables
- Cartas de control por atributos

Las Gráficas de control más utilizadas son las siguientes:

Por variables:

Carta	Descripción	Campo de aplicación.
$\bar{X}-R$	Medias y Rangos	Control de características individuales.
$\bar{X}-S$	Medias y desviación estándar.	Control de características individuales.
X-Rm	Mediciones y rangos móviles	Control de un proceso con datos variables que no pueden ser muestreados en lotes o grupos.

Por atributos:

Carta	Descripción	Campo de aplicación.
p	Proporción	Control del porcentaje de unidades defectuosas.
np	Número de defectuosos	Control del número de piezas defectuosas.
c	Defectos	Control de número global de defectos por unidad.
u	Promedio de defectos por unidad	Control del promedio de defectos por unidad.

Dentro de las cartas de control que se construyen en este trabajo están: la carta de control para medias y la carta de control para rangos, la primera permite conocer cuando el proceso está fuera de control y la segunda anticipa el cambio en la media, representando una alarma para esta. Su construcción y análisis se realiza a partir de la metodología recomendada por Gutiérrez (1997).

Según (Murcia y Martínez, 2005) existen dos conceptos de eficiencia de la producción: eficiencia tecnológica y eficiencia económica. La eficiencia tecnológica ocurre cuando la producción se genera con la menor cantidad de insumos. La eficiencia económica es reconocida cuando se produce al mínimo costo. Alva-Arguez y Savulescu (2009); Klemeš (2007); Martínez-Patiño, *et al* (2010) plantean que un manejo eficiente del agua y energía conduce a procesos más eficientes desde el punto de vista técnico y económico.

Actualmente se consume mucha agua en la industria azucarera, lo que es un serio problema para algunos países debido a lo limitado de sus recursos hídricos. La industria azucarera puede alcanzar altos volúmenes de consumo de agua que incluyen hasta casi **141 kg/t caña molidas**, como máximo (Castellanos, *et al*, 2005).

Se deben buscar vías que conduzcan a un aumento de la eficiencia y una disminución de los costos de producción, principalmente a través de un aumento de la producción de azúcar sobre la base de una disminución de las

pérdidas de sacarosa que se originan en el proceso industrial. Estas pérdidas que se refieren al azúcar que queda remanente en productos tales como: bagazo, cachaza y miel final. De ahí la gran importancia del control del proceso en las etapas de extracción y purificación. (Azaret, *et al* 2005)

La extracción es la etapa del proceso industrial que más afecta las ganancias en un central azucarero, por concepto de pérdidas. Además, el área de extracción resulta determinante para todo el proceso industrial, tanto para la producción de azúcar, como en los derivados (Gómez, 2006).

El residuo fibroso (bagazo) de la extracción del jugo en el proceso de fabricación de azúcar a partir de caña, es el principal combustible empleado para generar el vapor necesario en las operaciones de producción. De su calidad y de los equipos disponibles para su quema dependerá la eficiencia de generación de vapor, y por lo tanto, la economía térmica del proceso. El contenido de humedad final, con gran influencia en la calidad del bagazo como combustible, dependerá de la eficiencia del sistema de extracción del jugo y del nivel de imbibición empleado (agregado de agua durante la extracción) (Diez, 2010).

En cuanto al proceso de clarificación (Marín, 2012) plantea que sus resultados afectarán el resto del proceso de producción de azúcar y finalmente su calidad como producto comercial. Por tal motivo, se debe tener especial cuidado en la estación de clarificación.

1.2.3.2: Instrumentación.

El objetivo central de los instrumentos, es la medición, el registro y el control de las variables de proceso, lo que permite la supervisión de los procesos de transformación de las materias primas y de manufactura, manteniéndolos dentro de los límites de seguridad y calidad adecuados. Los datos que aportan los instrumentos de campo industriales, son agrupados en las bases de datos de los registradores, los sistemas de adquisición de datos y los sistemas de control. Posteriormente, son compartidos y diseminados a través de los distintos niveles jerárquicos de las plantas y son la base de los sistemas de información gerencial. En base a esta información, los supervisores y los operadores manejan y corren los procesos. de Prada, (2014); Vegas (2014).

1.2.3.3: Balances de masa.

El balance de materiales es un método matemático basado en la ley de conservación de la masa. Sirve para determinar flujos de entrada y salida de un proceso o equipo en particular, así como la composición de un componente o varios en una corriente de interés. Los balances de materiales pueden ser con o sin reacción química dependiendo del proceso en que se aplique, con la diferencia entre ellos de que en el balance con reacción química, en la ecuación que lo representa aparece un término de generación y otro de consumo por el mismo concepto y en el balance sin reacción química no sucede así, y que como consecuencia el cálculo depende de la estequiometría de la reacción (Chejne, 2007).

1.3: Normalización de los procesos de extracción y purificación.

Muchas son las normas con las cuales se trabaja en la industria azucarera, en este epígrafe se van a tratar solo las normas de las variables del proceso que más interesan para el desarrollo posterior del trabajo.

Diversos son los autores que refieren valores normativos de las variables que se controlan en la industria azucarera. El cumplimiento de estos valores o no, determina la eficiencia de las mismas. Estos valores pueden diferir de un autor a otro debido a las características de la caña.

1.3.1: Normalización en la etapa de extracción.

Un documento normativo muy importante en la industria azucarera cubana es el Manual de Operaciones, el cual relaciona los valores normados por los cuales se rige el proceso.

La materia prima para la fabricación de azúcar crudo, ha de satisfacer un conjunto de requisitos mínimos de calidad para que la industria al procesarla adecuadamente sea capaz de desarrollar una producción estable de calidad y eficiente. El contenido de azúcares totales es del **10** al **16** %, el contenido de fibra en caña con valores medios en porcentaje del **9** a **16**, de la presencia de materia extraña se admite un límite máximo del orden del **3** al **5** % de la caña. (Manual de Operaciones, 2013).

Según ICIDCA (2012) el porcentaje de fibra en caña, el cual debe estar en un rango de **12,0 a 13,0** %. (Casanova y Alonso, 2006) refieren valores de fibra en

caña de **13,5 a 14,5 %** valores muy superiores a los anteriores. Sin embargo, (Carrazana, 1987) da un rango más amplio el cual se encuentra de **9,0 a 16,5 %**. Estas variaciones pueden deberse a las características propias de cada caña.

ICIDCA (2012) refleja el porcentaje de Pol en caña está de **13,5 a 14,5 %**, (Casanova y Alonso 2006) plantean valores de Pol en caña de **12 a 14 %** por lo que estos valores se encuentran dentro del rango anterior.

Medidos todos estos parámetros a la entrada del central, esta valoración ofrece una idea muy real del potencial azucarero de la caña que procesa la industria. En la industria Azucarera Cubana se evalúa este potencial a partir del análisis del jugo de la primera extracción y se denomina genéricamente *Azúcar Recuperable*.

También son medidos otros como el Brix del jugo primario o jugo de la primera extracción y el Brix del último jugo extraído. El primero se debe encontrar de **15 a 25 (°Bx)** y el último debe ser menor a **10 (°Bx)** (Manual de Operaciones, 2013). (Carrazana, 1987) tiene como referencia para el primer jugo extraído valores de **16,5 a 23 (°Bx)** y para el último jugo extraído valores entre **4,5 y 8,0 (°Bx)** estos constituyen valores bastante cercanos a los anteriores.

El agua de imbibición añadida debe ser hasta un **25 % del peso de la caña** como máximo, siempre que la dilución en el jugo no reduzca su densidad por debajo de 14 (°Bx). Con esto se logra mejorar la extracción tanto de Pol como de jugo. (Manual de Operaciones, 2013).

Este documento también presenta que la cantidad óptima de agua de imbibición a aplicar debe ser de **1,8 a 2,0 veces el contenido de fibra en la caña**, como compromiso entre la extracción de Pol y los requerimientos de evaporación.

Una de las variables fundamentales que se controla en el proceso de extracción es el agua de imbibición añadida. (Rein ,2007) refiere que la extracción de trenes de molinos se incrementa rápidamente con el aumento de la tasa de imbibición hasta al menos **250-280 % fibra**. A partir de este momento la

respuesta comienza a declinar, aunque continúan siendo posibles ganancias significativas de extracción hasta aproximadamente **350 %** en fibra.

(Hugot, 1986) plantea que la relación entre el peso del agua de imbibición y el peso de fibra () el cual es el que caracteriza la imbibición, para una óptima imbibición debe estar cercano a **2**. La extracción aumenta muy rápidamente cuando varía de **0 a 1**, aún bastante aprisa, de **1 a 2** y más lentamente arriba de **2**. No se obtiene ninguna ventaja al sobrepasar **3**.

(ICIDCA, 2012) presenta valores de agua de imbibición % de caña de **18,0 a 22,0**. Mientras tanto Ordóñez (2004) presenta un valor de **27 %**, este valor se encuentra superior al rango anterior. Otros autores que muestran dentro de los valores usuales al agua de imbibición son (Casanova y Alonso, 2006) donde los valores de agua de imbibición % en caña se encuentran de **18 a 28 %**, valores que están dentro de los rangos anteriores.

Del agua de imbibición también es importante destacar la temperatura a la cual es añadida. En el Manual de Operaciones (2013) se plantea que debe estar entre **60 y 80 °C**. (Ordóñez, 2004) plantea que la temperatura debe ser de **60 °C** valor el cual está dentro del rango anterior. (Hugot, 1986) plantea que la temperatura conveniente de agua de imbibición es entre **80 y 85 °C** a estos valores se favorece la extracción y además se evita el desarrollo microbiano, un rango mucho más amplio que los dos anteriores. Mientras que (Van der Poel, 1998) propone valores de **75 a 80 °C**.

La temperatura del agua de imbibición no debe exceder de **60 a 80 °C**, para evitar la extracción de gomas, ceras, e impurezas indeseables. Algunos técnicos recomiendan temperaturas más altas para mejorar la extracción, pero el efecto de esto puede ser perjudicial ya que las masas pueden pulirse demasiado y ocasionar resbalamientos y dificultades en la alimentación de las mismas. No puede existir duda en cuanto a que mayor extracción de impurezas indeseables por el molino, el recobrado de azúcar en el proceso de fabricación será menor. Por lo tanto la selección de la temperatura del agua de imbibición tiene que contemplar la eficiencia de producción de azúcar en su totalidad y no tan solo en la extracción del molino.

Otro valor normado según el Manual de Operaciones (2013) es el Brix del jugo mezclado el cual debe oscilar entre **13 y 15** (°Bx). Atendiendo a la clarificación no debe ser superior a **15** (°Bx) debiéndose aplicar más agua para no sobrepasar este valor. Por otra parte, el agua se debe reducir si el Brix es inferior a **13** (°Bx). Con respecto a esto Ordóñez, (2004) plantea que el Brix del jugo diluido debe ser superior a **14,5** (°Bx), este valor se encuentra dentro del rango anterior. Sin embargo, (Casanova y Alonso, 2006) presentan valores de **13,5 a 16,5** (°Bx) rango algo superior a los anteriores. El jugo mezclado es la materia primera de la casa de caldera, es una solución de sacarosa en agua, este se debe obtener con una pureza del **80** %.

El bagazo que se obtiene de los molinos con porcentaje de fibra en bagazo también es medido, (Casanova y Alonso 2006) dan valores de **47 a 49** %, mientras que (Carrazana, 1987) ofrece valores de **43,0 a 47** % siendo este un rango más bajo.

Otros autores como (Hugot, 1986) plantean que la Pol en bagazo que no debe sobrepasar el **2,32** %. En molinos bien ajustados y con una imbibición eficiente deben esperarse valores de Pol en bagazo entre **3 y 3,5** % y aún inferiores, haciendo mínimas las pérdidas en bagazo (Honing, 1987).

En el Manual de Operaciones (2013) se dan valores de Pol en bagazo **1,5 a 2,5** %. Otra variable normada es la humedad del bagazo, (Junco, 2011) presenta un valor de humedad del **50** %, mientras que (Ordóñez, 2004) da un rango de **49 a 51** % y (Carrazana, 1987) de **46 a 52** %, siendo este más amplio que los dos últimos. La Pol de diferentes corrientes también es un valor normado por diversos autores.

Otro valor de Pol medido son la Pol del jugo mezclado, (Casanova y Alonso, 2006) refieren valores de **11,5 a 13,5** % y respectivamente. En el Manual de Operaciones (2013) se dan valores de Pol del jugo mezclado de **9 a 17** % un rango mucho más amplio que el anterior.

1.3.2 Normalización en la etapa de purificación.

En la etapa de purificación también son normadas numerosas variables para el control del proceso. Al garantizar el cumplimiento de las normas se garantiza un buen funcionamiento en etapas posteriores.

Según la bibliografía consultada en esta etapa es muy importante controlar las condiciones en el clarificador para evitar las pérdidas de sacarosa. Entre las variables están el pH de diferentes corrientes, la temperatura, Brix y Pol. Se van a mencionar las normas de estas variables en la alcalización, la clarificación y la filtración.

La calidad de la cal por emplear al igual que la dosificación, son aspectos importantes que hay que considerar dentro de la purificación de los jugos. Las especificaciones de calidad que debe cumplir el hidrato de cal para ser empleado en el proceso son: Óxido de calcio aprovechable (mínimo) del 70 %, Óxido de magnesio (máximo) de 2.5 %, Insolubles al ácido clorhídrico de 1.5 %, Humedad (máximo) de 2.0 %, Sílice en forma de óxido (máximo) a 2.0 %. El Manual de Operaciones, (2013), ofrece el procedimiento para la preparación de la lechada de cal, estableciendo que se prepara a 20 Baumé, y se diluye hasta 4 Baumé para adicionársele al jugo.

El Manual de Operaciones (2013) establece para la alcalización fraccionada que el jugo pre alcalizado debe tener un pH de 6.5 a 6.8 en frío y la rectificación de la alcalización hasta un pH de 7.8 a 8.0.

La temperatura de salida de los calentadores debe mantenerse en 103 °C. Sobrepásese este límite solo en casos excepcionales de presencia de tierra y exceso de bagacillo. (Manual de Operaciones, 2013)

Según (Carrazana, 1987) y (Matute, 2012) el pH del jugo clarificado debe estar de **6,0 a 7,0** esto para evitar un pH ácido el cual descompone a la sacarosa.

El Manual de Operaciones (2013) establece que para jugo clarificado el pH debe estar entre de **6.5 a 7.1**.

Otro valor que se mide es el Brix del jugo clarificado el cual (Carrazana, 1987) ofrece valores entre **13 y 17** (°Bx). Parecido a este rango el Manual de Operaciones (2013) refiere valores entre **14 – 18** (°Bx), mientras que (Matute, 2012) refleja un rango más pequeño de **12 – 14** (°Bx) y (Junco, 2011) da un rango de **12 a 16** (°Bx).

En cuanto a la filtración es muy importante controlar los parámetros referidos a la torta de cachaza pues esta se elimina del proceso por lo que debe poseer el mínimo de sacarosa posible para así evitar pérdidas.

(Jenkins, 1988) destaca que los mejores valores de Pol en cachaza se encuentran cercanos a **1 %** y dependen del tipo de filtro utilizado, de la cantidad de agua de lavado y de las características de la torta. (Arca et al, 1988) establece que el porcentaje de Pol en cachaza debe estar entre **1,5 y 3,0 %**.

En el Manual de Operaciones (2013), se establece un contenido de Pol en cachaza del **1 al 3 %**.

Uno de los parámetros más importantes que controlan la pérdida de Pol en cachaza es el agua de lavado % en cachaza. (Hugot, 1986) plantea que en general se utilizan de **100 a 150 agua % torta**. Esta agua debe preferentemente estar a **75 a 80 °C**. Mientras que (Rein, 2007) plantea que la cantidad de agua aplicada está típicamente en el rango de **1 a 2 kg/kg de torta, o de 6,5 a 13 kg de agua de lavado/kg de sólidos de lodos en cachaza**. La cantidad de agua utilizada representa típicamente alrededor de una cuarta parte del flujo de agua de imbibición usado en los trenes de extracción. El Manual de Operaciones (2013) y (Arca et al, 1988) coinciden en que el máximo de agua de lavado a aplicar debe ser de **150 agua % torta**.

En cuanto a la cantidad de bagacillo que debe ser añadido (Arca et al, 1988) da valores de **3-6 kg/ton de caña** y (Rein, 2007) plantea que al adicionar bagacillo, considerando la llegada de mayor cantidad de suciedad del campo se puede esperar un valor entre **0,5 y 0,7 t fibra seca/100 t de caña**.

El Manual de Operaciones (2013) destaca que el contenido de bagacillo en la mezcla se debe encontrar en el orden del **10 al 15 % en peso**.

De la humedad de la cachaza (Arca et al, 1988) plantea que debe estar entre **75 y 80 %**, mientras que el Manual de Operaciones (2013) plantea un rango más pequeño de **74 a 76 %**.

1.3.3: La separación de insolubles en el área de purificación.

Según (Pérez y Díaz, 1989) en su publicación en la revista centro azúcar, la eficiencia de separación de insolubles en la etapa de purificación no era

evaluada, por dos razones fundamentales, la ausencia de esta visión técnica y por tanto de una metodología para evaluar la misma. La autora de este trabajo considera que aun cuando la segunda razón quedó descartada desde la presentación de los resultados de estos especialistas, la primera razón se mantiene pues en la actualidad sigue sin aplicarse evaluación alguna de la separación de materiales insolubles a pesar de ser este el único objetivo de toda la etapa de purificación. Es esta la razón por lo cual se incluye este aspecto se incluye en la investigación.

La eliminación de los materiales insolubles durante el proceso de azúcar crudo tiene lugar fundamentalmente durante la etapa de purificación. Durante la purificación una parte de las impurezas solubles que viene en el jugo son llevadas a la condición de insolubles por la acción de la cal, el calor y posteriormente separadas, conjuntamente con otros materiales insolubles contenidos en el jugo, por sedimentación en los clarificadores o por filtración en el filtro rotatorio. Los sólidos insolubles que no sean separados en este proceso, continuaran su paso a través del proceso de evaporación, cristalización y centrifugación y pueden quedar en el producto final sobre la película de miel que rodea los cristales de azúcar u ocluidos en el interior de los cristales. (Pérez y Díaz ,1989)

Conclusiones parciales del análisis bibliográfico.

1. Las etapas de extracción y purificación constituyen operaciones de vital importancia en el procesamiento industrial de la caña de azúcar con el propósito de alcanzar los parámetros de calidad requeridos.
2. Las normalizaciones y/o los criterios de medida de los especialistas sobre las principales variables en estas dos etapas nos permiten evaluar y controlar el proceso para alcanzar una alta calidad y eficiencia en el mismo.
3. Las principales variables a tener en cuenta para la evaluación de la disciplina tecnológica en las dos áreas objeto de estudio han sido seleccionadas a partir del criterio de los especialistas.

Capítulo 2: Materiales y Métodos.

En el presente capítulo se realiza una descripción del proceso tecnológico de producción y de las etapas de extracción y purificación del jugo, la selección de los parámetros para el Control del Proceso, el procedimiento empleado para la caracterización estadística de las operaciones de las dos etapas de producción y la valoración económica del proceso.

2.1: Descripción del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo.

Se denomina azúcar a la sacarosa, cuya fórmula química es $C_{12}H_{22}O_{11}$, llamado azúcar común o azúcar de mesa. La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha. El azúcar es una importante fuente de calorías en la dieta alimenticia moderna, pero es frecuentemente asociado a calorías vacías, debido a la completa ausencia de vitaminas y minerales. Las variedades de cañas seleccionadas, se cultivan en buenas condiciones de clima y suelo, bajo supervisión agrónoma especializada. (Marín, 2012)

A continuación, se muestra una caracterización detallada de las diferentes etapas del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo.

En el Anexo 1 se muestra el diagrama general de producción en el central azucarero “Jesús Rabí”.

La Empresa Azucarera “Jesús Rabí” tiene como objetivo principal producir y comercializar de forma mayorista azúcares y mieles, derivados. Subproductos tales como ceniza, cachaza, bagazo, residuos agrícolas de la cosecha y otros provenientes de la agroindustria, así como energía eléctrica para el sistema de la Unión Eléctrica.

Para la transformación de la materia prima (caña de azúcar) hasta el producto final (el azúcar) se identifican 7 etapas fundamentales:

1. Etapa de preparación y molienda

2. Etapa de purificación.
3. Etapa de concentración o evaporación.
4. Etapa de cristalización.
5. Etapa de centrifugación.
6. Etapa de generación de vapor.
7. Etapa de generación de energía eléctrica.

2.1.1: Etapa de preparación y molienda.

La caña después de ser pesada se recibe en el basculador, donde es necesario prepararla para lograr altas molidas y eficiencia, es en esta área donde se troza y tritura la caña conducida por medio de esteras a los molinos.

El tándem de molinos está integrado por 5 unidades de 4 mazas, con un diámetro medio de 40 pulgadas, de 7 pies de longitud, cada uno con su respectivo tren de engranes. Todos los molinos tienen tolva *Donelly* y están accionados por motores eléctricos de rotor bobinado, un motor por unidad de molienda. La presión de trabajo del 1ro y 5to molino es de **211 kgf/cm² (3000 lb/pulg²)** y en el 2do, 3ro y 4to es de **204 kgf/cm² (2900 lb/pulg²)**.

El último molino entrega el bagazo a un conductor de banda que lo eleva al rastrillo repartidor de las calderas. Existe un colador rotatorio, cinco conductores de arrastre, tres bombas de maceración, dos bombas de jugo diluido y una bomba de agua de imbibición.

En los molinos el primero extrae el jugo de mayor concentración de sacarosa que pasa directamente al colador, el bagazo va pasando por los restantes molinos para continuar extrayéndole jugo. Para una mejor extracción de sacarosa y además mantener protegido al tándem contra el desarrollo de microorganismos se le añade agua de imbibición antes de pasar al último molino, la cual debe estar alrededor de los **70 °C** y no más alta porque si no los molinos resbalan por la cera que tiene la caña; el jugo extraído pasa por un proceso de recirculación del quinto molino al cuarto y así sucesivamente hasta el segundo. El jugo mezclado contiene partículas

sólidas y bagazo por lo cual pasa por un filtro colador donde es filtrado, el bagazo extraído se incorpora al proceso por medio de una estera al segundo molino. Todo el bagazo obtenido se separa del bagacillo y pasa hacia las calderas.

2.1.2: Etapa de purificación.

El jugo proveniente del filtro colador con un pH alrededor de **5,2 a 5,7** pasa al tanque de alcalizar. Allí se le adiciona lechada de cal diluida previamente preparada con una proporción que va desde **500 y hasta 650 gramos de CaO** por tonelada de caña molida, con el objetivo de aumentar el pH del jugo entre **7,5 y 8,1**.

Para un mejor aprovechamiento energético existen calentadores primarios, secundarios y rectificadores cuya función es calentar el jugo alcalizado hasta **106 °C** (a temperaturas mayores se destruye la sacarosa) para acelerar las reacciones químicas de la cal con el jugo y así facilitar el trabajo de los clarificadores.

De los calentadores el jugo es bombeado al tanque flash para eliminar los gases que acompañan al jugo y mantener una temperatura uniforme alrededor de los **100 °C** a la entrada del clarificador, donde el jugo alcalizado se mezcla con floculante para completar la reacción de formación y sedimentación de los flóculos de fosfato tricálcico logrando una perfecta separación en dos fases, la primera de jugo claro y la segunda los lodos o cachaza. Los lodos del clarificador, son llevados a un mezclador donde se le adiciona bagacillo como medio filtrante, en proporción suficiente como para formar una torta con buenas propiedades físico mecánicas. El proceso de agotamiento de la torta se lleva a cabo en los filtros rotatorios al vacío, el jugo extraído de la cachaza es bombeado al tanque de alcalizar y la cachaza va hacia la tolva de cachaza donde es recogida y posteriormente utilizada como fertilizante. El jugo clarificado pasa a la etapa de evaporación.

2.1.3: Etapa de concentración o evaporación.

Este subproceso, a su vez se define como el centro de balance energético del ingenio pues recibe vapores de escape de alta presión y entrega vapores vegetales a calentadores y tachos. Por otra parte, entrega condensados puros y de alta

temperatura útiles para la alimentación de las calderas, tributando a la reducción de la demanda de agua adicional para el proceso.

La etapa de concentración está compuesta por los pre-evaporadores y los evaporadores. El objetivo de ella es evaporar el agua contenida en el jugo clarificado la cual se encuentra entre **73 y 75 %** bajo el principio del múltiple efecto y obtener una disolución más concentrada. El producto final que se obtiene en este proceso es la meladura, con un Brix aproximado de **62 %** y una pureza de **85 %**.

2.1.4: Etapa de cristalización.

La cristalización de la meladura se realiza mediante un proceso de sobresaturación a partir de la disminución del solvente manteniendo fija la concentración del soluto a partir de la evaporación, en tachos al vacío con una temperatura de entre **60 y 70 °C**. A partir de aquí el proceso deja de ser continuo, pues la cristalización y el crecimiento de los granos de azúcar en los tachos es de forma *batch* y por lotes. En la fábrica de azúcar a analizar el esquema básico de producción es de tres masas cocidas, siendo este el más tradicional y simple, utilizado para producir un crudo de polarización mínima de 97,80 % y de un color en el rango de las 25 a las 30 unidades de color Horne (UCH).

La industria cuenta con 7 tachos, los cuales trabajan a simple efecto con extracciones de los pre-evaporadores. El esquema de trabajo de los tachos se refleja a continuación:

Tacho 1. Cristaliza, elabora pie de masa cocida C, Elabora MCC Tacho 2. Elabora masa cocida B

Tacho 3. Elabora masa cocida C Tacho 4. Elabora masa cocida A

Tacho 5. Carga semilla. Mejora pie de semilla Tacho 6. Elabora pie de MCA y, elabora MCA Tacho 7. Elabora pie de MCA y, elabora MCA

El sistema de masas cocidas que se emplea es el de tres masas cocidas con doble semilla. En la elaboración de las masas cocidas en tachos se trabaja de la forma siguiente:

-) La MCA se elabora con semilla B y meladura.
-) La MCB se elabora con semilla C y miel A.
-) La MCC se elabora con grano mejorado y miel B.
-) El grano mejorado se elabora a partir del grano fino y miel B.
-) El grano fino se elabora a partir de una cristalización a **82 %** de pureza como mínimo y miel A, adicionando miel B si las purezas son muy altas.

2.1.5: Etapa de centrifugación.

La centrifugación es un proceso que tiene como objetivo separar los granos de azúcar de la miel o licor madre, o sea que se trata de un proceso de separación de mezclas, donde se separa la parte sólida (azúcar) de un líquido (miel).

El material de entrada al proceso son las masas cocidas procedentes de la cristalización. En el caso de las masas comerciales, esta separación produce un azúcar con más del **98,0 %** de pureza y granos con suficiente tamaño, alrededor de **0,65 y 0,80 mm**, para su realización comercial, las mieles obtenidas de la separación (A y B) son retornadas al proceso para ser agotadas. En el caso de las masas de agotamiento, el azúcar centrifugado se retorna hacia los tachos (como semilla) pues su tamaño, en el orden de los **0,25 a 0,40 mm** y su pureza inferior al **90,0 %** no constituyen un producto apto para la comercialización y la miel ya agotada como producto final se entrega a los tanques de almacenamiento o hacia otras plantas de producciones derivadas.

De este subproceso es donde se deriva la definición de doble semilla al sistema de cocción de masas cocidas, este se debe a que se utiliza el azúcar obtenido de la centrifugación de la masa cocida C en la fabricación de la masa cocida B y el azúcar logrado de la centrifugación de esta masa cocida B en la fabricación de la masa cocida A.

En el área se encuentran 6 centrífugas comerciales ASEA 650, 3 centrífugas de doble semilla ACW 1000 A y 4 centrífugas de agotamiento ACW 1000.

2.1.6: Etapa de generación de vapor.

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

En esta etapa existen 2 calderas RETAL Acuotubular de 45 ton/h, con una presión de trabajo de **18 kgf/cm² (256 lb/pulg²)**, la temperatura del vapor es de **320 °C** como promedio, están provistas de un economizador, calentador de aire y un sobre-calentador, existen 2 bombas de agua alimentar. El área está compuesta por 3 rastrillos y un conductor de banda, además de una casa de bagazo. El vapor directo es entregado a la planta eléctrica.

2.1.7: Etapa de generación de energía eléctrica.

En el área de planta eléctrica se logra la conversión de energía calorífica en mecánica, mediante turbinas de vapor acopladas a un generador de electricidad para producir energía eléctrica, no solo para el abastecimiento del ingenio sino también para incorporar al sistema eléctrico nacional (SEN).

La electricidad se emplea para el funcionamiento de los motores eléctricos y otros usos de esta energía, y el vapor de escape para el proceso de fabricación en los equipos que demandan calor.

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

En esta etapa existen 3 turbogeneradores alemanes de **1,5 mW**, la capacidad total instalada es de **4,5 mW**. Nominalmente los turbogeneradores trabajan a **18 kgf/cm²** con **310 °C** de temperatura en el vapor directo y **1,266 kgf/cm²** de escape. Además, existe un enfriadero.

2.2: Selección y caracterización de las áreas objeto de estudio.

Las áreas seleccionadas para su estudio son extracción y purificación. Estas fueron seleccionadas debido a la gran importancia que tienen para todo el proceso en general, tanto económica como productivamente. Del buen funcionamiento de ellas depende la calidad del producto final, así como las pérdidas que se pueden originar.

2.2.1: Área de extracción.

En la etapa de extracción de un Central se extrae el jugo de la caña el cual contiene la sacarosa que va a ser tratada durante todo el proceso. Es por eso que en esta etapa se debe extraer la mayor cantidad de sacarosa contenida en la caña, pero sin sacrificar la eficiencia de etapas posteriores.

En esta etapa se obtiene además el bagazo que es utilizado en los hornos como combustible para la generación de vapor. Este bagazo debe contener la menor cantidad de agua posible para así poder obtener mayores rendimientos en la generación de calor por los hornos.

Las pérdidas se reflejan en la Pol del bagazo, las cuales deben ser lo más bajas posible para que el rendimiento en todo el proceso sea elevado.

Un parámetro fundamental en esta área lo constituye el agua de imbibición a añadir, pues esta permite agotar satisfactoriamente los azúcares presentes en la caña. Encontrar los mejores valores de agua de imbibición a añadir es de suma importancia para el proceso. A mayor cantidad de agua mejor extracción, pero sin perjudicar al área de evaporación que pudiera verse sobrecargada. Por todo lo planteado anteriormente se escoge esta área para su análisis.

2.2.2: Área de purificación.

En la etapa de purificación se eliminan la mayor cantidad de impurezas que contiene el jugo, además se obtiene la cachaza la cual sale del proceso, obteniéndose pérdidas elevadas de sacarosa para el proceso en este flujo de salida si se trabaja inadecuadamente. Por otra parte, cuando esta etapa no se realiza satisfactoriamente se obtienen azúcares de baja calidad y con un gran contenido de cenizas.

La eliminación de impurezas del jugo es de suma importancia pues estas son formadoras de color, por lo que afectan la calidad del producto final.

El buen trabajo de esta etapa repercute en la calidad de los productos, el rendimiento del azúcar, facilita la cristalización de la sacarosa, reduce el alto contenido de cenizas, entre otras.

En la purificación es muy importante el subproceso de filtración pues de este sale la cachaza la cual contiene azúcares que no se pueden recuperar más durante el proceso. Los flujos de agua de lavado y bagacillo deben ser controlados con responsabilidad. El bagacillo permite obtener una torta de mayor volumen y porosidad lo cual facilita la filtración, mientras que con el agua de lavado se obtiene una mayor recuperación de azúcares en el jugo filtrado. Estos dos flujos deben añadirse adecuadamente para disminuir las pérdidas de azúcares en cachaza. Por la importancia que tiene esta área para toda la industria se escoge esta para su estudio.

2.3: Selección de las variables para el Control del Proceso.

Las variables para el Control del Proceso fueron seleccionados del Manual de Operaciones (2013) el cual es utilizado en todas las industrias azucareras del país, presenta las variables que se deben controlar en cada una de las áreas, así como sus valores normativos. Es importante aclarar que se mantienen las mismas unidades que son empleadas en la industria, aunque en algunos casos estas no pertenecen al sistema internacional de unidades, para conservar su validez y fácil interpretación por los técnicos de la industria, se muestra en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Listado de variables seleccionadas para el estudio de las áreas de extracción y purificación.

Área de extracción			Área de purificación		
Parámetros analizados	Unidad de medida	nomenclatura	Parámetros analizados	Unidad de medida	nomenclatura
caña molida	(t/h)	CM	Concentración de la lechada de cal	(°Be)	Conc.LC
Fibra en caña	(%)	FCM	Brix jugo alcalizado	(°Bx)	Brix.JA
Pol en caña	(%)	PolCM	pH de jugo alcalizado		pHJA
Pol Jugo de la 1ra extracción	(%)	Pol1ra	Temperatura de salida de los calentadores	(°C)	T.Scal
Brix Jugo de la 1ra extracción	(°Bx)	Brix1ra	Brix jugo clarificado	(°Bx)	Brix.JC
pH Jugo de la 1ra extracción		pH1ra	Pol jugo clarificado (%)	(%)	PolJC
Pol de jugo mezclado (%)	(%)	PolJM	pH de jugo clarificado		pHJC
Brix jugo mezclado (°Bx)	(°Bx)	BrixJM	Brix jugo filtrado	(°Bx)	Brix.JF
pH de jugo mezclado		pHJM	Pol jugo filtrado	(%)	PolJF
Agua de Imbibición	(m³/h)	AI	Temperatura del agua de lavado	(°C)	T.AL
Temperatura agua de imbibición	(°C)	T.AI	Insolubles en lodos	(%)	Ins.L
Fibra en bagazo (%)	(%)	FBg	Insolubles en jugo filtrado	(%)	Ins.JF
Humedad en bagazo	(%)	HBg	Insoluble en jugo clarificado	(%)	Ins.JC
Pol en bagazo	(%)	PolBg	Insolubles en jugo mezclado	(%)	Ins.JM
% Materia extraña	(%)	ME	Insoluble en jugo alcalizado	(%)	Ins.JA
Presión del último molino	(kg/cm²)	P. últ mol	Pol en cachaza	(%)	PolCa
			Humedad de la cachaza	(%)	Hum.C
			Cachaza% caña	(%)	CAZ%CM
			Presión de bajo vacío	mmHg	Pb.vacio
			Presión de alto vacío	mmHg	Pa.vacio

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1: Metodología empleada para la caracterización estadística.

Para el trabajo con las mediciones realizadas en las etapas de extracción y purificación, se hace imprescindible la realización de un análisis estadístico a cada una de las variables operacionales con las que se trabaja. Este análisis se basa en el estudio estadístico a través de la media, varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los valores de los coeficientes de *Asimetría* y *Curtosis*, comprobando que se encuentren dentro del alcance esperado (-2 y 2) y las cartas de control, con la finalidad de obtener criterios que caractericen de forma estadística el funcionamiento de las áreas y permita detectar las desviaciones significativas de los parámetros de operación normados. Los datos fueron recolectados en el período comprendido entre el 1 y el 28 de febrero del 2018. En este período solo se dejaron

de tomar datos un día, porque se presentó una rotura en la fábrica. Estos parámetros son calculados mediante las fórmulas siguientes:

$$\text{Media } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Varianza } s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Desviación estándar } s = \sqrt{s^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Coeficiente de variación } CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \dots\dots\dots (2.4)$$

2.3.1: Elaboración de cartas de control.

La correcta aplicación de esta herramienta aumenta la eficiencia y la productividad del trabajo, y permite detectar cambios y tendencias importantes en los procesos (Pérez, 2009). Por lo antes expuesto se realizan cartas de control a todas las variables medidas, para conocer su comportamiento y las desviaciones significativas respecto a su rango de variación natural para la primera carta y la segunda respecto a sus valores definitorios.

Badii y Guillen, (2018). El control de calidad es una herramienta que permite de una forma adecuada y consistente analizar procesos con el fin de estudiar su comportamiento y poder evaluarlo, de tal forma que si se hallan procesos fuera de control se puedan hallar las variables que ejercen ese comportamiento. Con la finalidad de que se puedan generar mecanismos que conminen a restablecer el control del proceso de tal forma que se puedan cumplir con las especificaciones planteadas dentro del mismo.

Son gráficas poligonales que muestran en el tiempo el estado de un proceso. Se dice que un proceso está bajo control estadístico cuando presenta causas comunes únicamente. Cuando existen causas especiales el proceso está fuera de control estadístico; las gráficas de control detectan la existencia de estas causas

en el momento en que se dan, lo cual permite que podamos tomar acciones al momento.

Las gráficas de control se usan entre otras cosas:

-) Para verificar que los datos obtenidos poseen condiciones semejantes.
-) Para observar un proceso productivo, a fin de poder investigar las causas de un comportamiento anormal.
-) Al distinguir entre las causas especiales y las causas comunes de variación, dan una buena indicación de cuándo un problema debe ser corregido localmente y cuando se requiere de una acción en la que deben de participar varios departamentos o niveles de la organización.

Se puede decir que un proceso está fuera de control en los siguientes casos:

- 1) Existen puntos fuera de los límites de control.
- 2) Existen 5 o más puntos consecutivos de un mismo lado de la línea central.
- 3) Existen 7 puntos consecutivos en orden ascendente o descendente.
- 4) Existen 2 o 3 puntos consecutivos demasiados cerca de uno de los límites de control.
- 5) A medida que pasa el tiempo es mayor la estabilidad del proceso.

2.3.1: Obtención de las variables.

El muestreo de las variables en el Central “Jesús Rabi” se realiza durante el mes de febrero. Las variables se trabaja juntas en cada área, es decir el muestreo de las variables en el área de extracción y muestreo de las variables en el área de purificación. En las dos áreas se hace necesario el análisis efectuado en la propia industria, por lo que se toman algunos de los valores de las variables que realizan los especialistas.

Los análisis en el laboratorio se realizan según las técnicas del MACU (2004).

2.3.1.1: Metodología para el muestreo de las variables en el área de extracción.

La frecuencia de muestreo de las variables en esta área es de una hora.

La caña molida se pesa en el basculador, cada una hora se toma el valor de esta, de igual forma se miden las demás variables. A la materia prima se le controla: fibra en caña, materia extraña y Pol en caña (Estos valores se toman de la hoja de análisis del Central).

Mediante instrumentos de medición instalados en el proceso se determinan el flujo de agua de imbibición, su temperatura y la presión del último molino. Mientras que en el laboratorio se determinan: el Brix del jugo mezclado, el Brix del jugo primario, la Pol del jugo mezclado, Pol del jugo primario, pH del jugo mezclado, pH del jugo primario, fibra en bagazo, Pol del bagazo y Humedad del bagazo.

Los insolubles en jugo mezclado se realizan tres veces al día, los insolubles son determinados por la autora, pues se utiliza como parámetro de control del proceso.

Para conformar la muestra de insolubles se toman varias muestras de jugo en diferentes horarios y se conforma tres muestras. Esto se le realiza a todos los jugos a los cuales se le realiza insolubles.

2.3.1.2: Metodología para el muestreo de las variables en el área de purificación.

La frecuencia de muestreo para las variables en esta área es de una hora.

El Brix de jugo alcalizado, pH del jugo alcalizado, Brix del jugo filtrado, Pol del jugo filtrado, Brix del jugo clarificado, Pol del jugo clarificado, pH del jugo clarificado, Concentración de la lechada de cal, Cachaza % Caña, humedad de la cachaza, Pol de la cachaza se tomaron de la hoja de análisis del Central.

La temperatura de salida del último calentador, la temperatura del agua de lavado y la presión de bajo y alto vacío en el filtro se determina a través de los instrumentos de medición colocados en el área.

Los insolubles en lodos, jugo filtrado, jugo clarificado y jugo alcalizado se hacen con la técnica correspondiente según el MACU (2004) en el laboratorio tres muestras al día debido a la complejidad de la técnica operatoria. Para realizarla se procede de igual forma que para los insolubles en jugo mezclado.

2.4: Balances de masa.

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para la realización de los balances de masa en las etapas de extracción y purificación, con el objetivo de determinar los flujos desconocidos que intervienen en el proceso. Para los cálculos se emplea la herramienta Microsoft Excel 2010, en donde se programan las ecuaciones.

2.4.1: Balances de masa en el área de extracción.

$$C + A = J_l + R \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

CM: Flujo de caña molida.

AI: Flujo de agua de imbibición.

JM: Flujo de jugo mezclado.

RL: Flujo de residuo leñoso (bagazo)

El balance por componentes teniendo en cuenta la fibra de cada corriente se muestra en la ecuación 2.2.

$$C \cdot F_C + A \cdot F_A = J_l \cdot F_J + R \cdot F_R \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

F_{CM}: Fibra en Caña molida

F_{AI}: Fibra en Agua Imbibición

F_{JM}: Fibra en Jugo Mezclado

F_{RL}: Fibra en Residuo Leñoso

La cantidad de bagazo se determina en forma preliminar a partir del contenido de fibra de la caña que va a ser procesada. Casi la totalidad de la fibra termina en el bagazo, pero alguna logra introducirse en el jugo crudo que va hacia la fábrica, y adicionalmente algo de bagacillo es requerido para utilizarse en los filtros rotativos al vacío. Ambas abandonan la fábrica en la cachaza. En ausencia de estas pérdidas, la cantidad de bagazo podría calcularse a partir de la masa de caña despreciando las fibras de caña en el jugo mezclado y en el agua de imbibición, por medio de la siguiente ecuación:

$$RL \times \frac{CM}{F_{RL}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Se realiza un balance por componentes para la sacarosa a través del Pol, este se muestra en la ecuación 2.4.

$$Pol_{CM} - CM \times Pol_{JM} - JM \times Pol_{RL} - RL \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde:

Pol CM: Pol de la caña molida.

Pol JM: Pol del jugo mezclado.

Pol RL: Pol del residuo leñoso.

De la ecuación 2.4 se tienen todos los datos excepto el flujo de jugo mezclado que se despeja de la misma y se muestra en la ecuación 2.5.

$$JM \times \frac{Pol_{CM} - CM \times Pol_{RL} - RL}{Pol_{JM}} \dots\dots\dots (2.5)$$

El flujo de agua de imbibición es un dato conocido, tomado de la sala de control de Central.

2.4.2: Balances de masa en la etapa de purificación.

El jugo extraído en los molinos (JM) se somete a la etapa de alcalización donde se le agrega la lechada de cal cuyo objetivo es elevar el pH hasta un valor aproximado de 7 y a su vez favorecer la coagulación, el jugo alcalizado se lleva a los calentadores y en los mismos se eleva la temperatura ligeramente por encima del

punto de ebullición con el objetivo de eliminar mediante la sedimentación los coágulos de impurezas que se forman. El jugo caliente pasa al clarificador donde ocurre la separación del jugo claro y la sedimentación de las impurezas (lodos), que se envían a un filtro para eliminar la cachaza y recuperar la porción de jugo contenido en ella (jugo filtrado), que se recircula al proceso de alcalización.

En la etapa de purificación el balance es complejo, puesto que es una etapa dentro del proceso, en la cual existen recirculaciones, según se muestra en el siguiente esquema general de esta etapa, el cual sirve como base para plantear las ecuaciones de balance general se muestra en la figura 2.

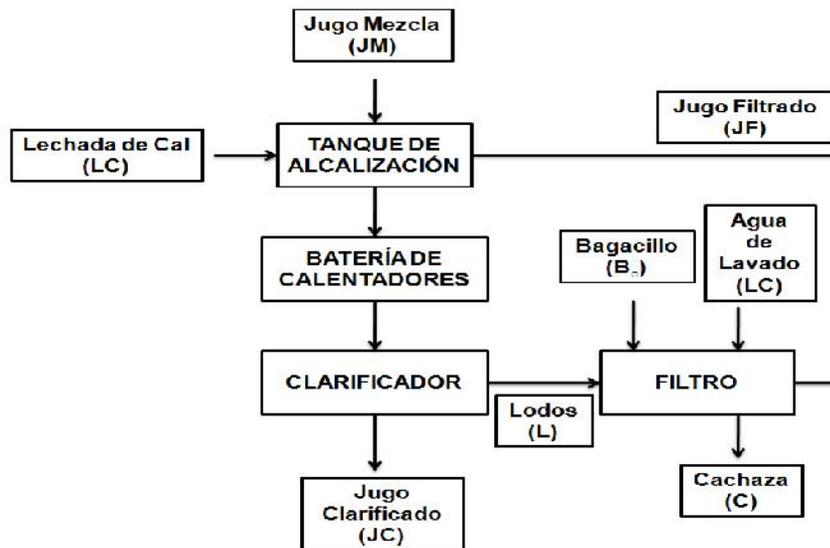


Figura 2.1: Esquema general del área de purificación.

Primero se realiza un balance de masa en el tanque de alcalización. Se plantean tres ecuaciones de balance: la 2.9 representa el balance general, la 2.10 el balance por componentes para los insolubles y la 2.11 el balance por componentes para el Brix.

$$J_i + J_l + L = J_a \dots\dots\dots (2.9)$$

$$I_n \cdot J_i + I_h \cdot J_l = I_h \cdot J_a \dots\dots\dots (2.10)$$

$$^{\circ}B \cdot J_i + ^{\circ}B \cdot J_l + ^{\circ}B \cdot L = ^{\circ}B \cdot J_a \dots\dots\dots (2.11)$$

Donde:

JF: Flujo de jugo filtrado.

LC: Flujo de lechada de cal.

JA: Flujo de jugo alcalizado.

Ins JM: Insolubles del jugo mezclado.

Ins JF: Insolubles del jugo filtrado.

Ins JA: Insolubles del jugo alcalizado.

Brix JM: °Brix del jugo mezclado.

Brix JF: °Brix del jugo filtrado.

Brix LC: °Brix de la lechada de cal.

Brix JA: °Brix del jugo alcalizado.

Esto se realiza con el objetivo de determinar el flujo de jugo alcalizado, por lo que se forma un sistema de tres ecuaciones lineales, en el cual se tienen tres incógnitas que son los flujos de jugo filtrado, de lechada de cal y de jugo alcalizado. Se tienen cero grados de libertad, porque se conocen los datos de insolubles y Brix de cada corriente y el flujo de jugo mezclado fue determinado con la ecuación 2.5, por lo que se procede a resolver el sistema. Se desprecian los insolubles de la lechada de cal.

Despejando se obtiene la ecuación 2.12, a partir de la cual se determina el flujo de jugo alcalizado.

$$J_A = J_I \cdot \left(\frac{\left(\frac{I_n}{I_i}\right)(1-\circ B) \quad)+\circ B \quad -\circ B}{\left(\frac{I_i}{I_n}\right)(1-\circ B) \quad)+\circ B \quad -\circ B} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

De la ecuación 2.13 se calcula el flujo de jugo filtrado (corriente que se recircula).

$$J_I = \left(\frac{I_i}{I_n}\right)J_A - \left(\frac{I_n}{I_i}\right)J_I \dots\dots\dots (2.13)$$

El flujo de la lechada de cal se despeja de la ecuación 2.9.

Se realiza un balance de masa en el clarificador con el objetivo de determinar los flujos de jugo clarificado y de lodos. La ecuación 2.14 corresponde al balance general y la ecuación 2.15 al balance por componente para los insolubles.

$$J_c = L + J_t \dots\dots\dots (2.14)$$

$$J_c \cdot I_1 = L \cdot I_1 + J_t \cdot I_1 \dots\dots\dots (2.15)$$

Donde:

L: Flujo de lodos.

J_c: Flujo de jugo clarificado.

Ins J_c: Insolubles del jugo clarificado.

Ins L: Insolubles de lodos.

Se tienen como datos los valores de los insolubles y el flujo de jugo alcalizado que fue determinado por la ecuación 2.12. Por lo que el sistema se resuelve. De la ecuación 2.16 se calcula el flujo de jugo clarificado y el flujo de lodos de la 2.14.

$$J_t = J_c \left(\frac{I_1}{I_1} - \frac{-I_1}{-I_1} \right) \dots\dots\dots (2.16)$$

Se realiza un balance por componentes en función del Brix, ecuación 2.17, para conocer el Brix de los lodos conociendo todos los Brix y el flujo de jugo alcalizado, jugo clarificado y lodos determinados anteriormente.

$$^{\circ}B = \frac{J_c \cdot ^{\circ}B - J_t \cdot ^{\circ}B}{L} \dots\dots\dots (2.17)$$

Conociendo la humedad y el Brix de la cachaza, se determinan los insolubles en la misma mediante la ecuación 2.18.

$$I_1 = 100 - H - ^{\circ}B \dots\dots\dots (2.18)$$

Donde:

Ins CZA: Insolubles en cachaza.

Hum CZA: Humedad de la cachaza.

Brix CZA: Brix de la cachaza.

Los insolubles en el bagacillo corresponden con el porcentaje en fibra del bagazo. El brix del bagacillo se determina por la ecuación 2.19.

$$^{\circ}B = 100 - H - \frac{R - F}{R} \dots\dots\dots (2.19)$$

Donde:

B_{ri} : Brix del bagacillo.

Se realiza un balance de masa en el filtro y se obtienen tres ecuaciones. La ecuación 2.20 representa el balance global, la 2.21 el balance por componentes para el Brix, y la 2.22 el balance por componentes para los insolubles.

$$L + B + A = J_i + C \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$L \cdot B + B \cdot B + A \cdot B = J_i \cdot B + C \cdot B \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

$$L \cdot I + B \cdot I + A \cdot I = J_i \cdot I + C \cdot I \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Datos:

B_o : Flujo de bagacillo.

A_L : Flujo de agua de lavado.

C_Z : Flujo de cachaza.

Se tienen como datos los Brix e insolubles de las corrientes involucradas. Además se calcularon anteriormente los flujos de lodos y jugo filtrado. Se desprecia el Brix y los insolubles del agua de lavado. El objetivo es calcular los flujos de bagacillo, agua de lavado y cachaza. A través de la ecuación despejada 2.23 se determina el flujo de cachaza.

$$C_Z = \frac{J_i \cdot B_o - B_o \cdot B + A_L \cdot B + B_o \cdot I - J_i \cdot I - C_Z \cdot I}{B - B_o} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

El flujo de bagacillo se determina por la ecuación despejada 2.24.

$$B_o = \frac{J_i \cdot B - A_L \cdot B - B_o \cdot I + C_Z \cdot I}{B - B_o} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

El flujo de agua de lavado se calcula despejando de la ecuación 2.20 del balance general.

La eficiencia del filtro por la ecuación 2.25.

$$\text{Perdidas} = \frac{C_Z \cdot Pol_C}{C \cdot Pol_C} \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

2.4.3: Metodología y expresiones para evaluar la eficiencia en la separación de insolubles en el área de purificación.

Con los valores del contenido de insolubles y los flujos medidos en la industria y utilizando las ecuaciones de balance de materiales anteriores, puede determinarse el resto de las corrientes necesarias para calcular los indicadores de eficiencia siguiente:

$$1. \text{ Eficiencia de purificación: } E_p \times \frac{InsJM \quad JM \quad Z \quad InsJC \quad JC}{InsJM \quad JM} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$2. \text{ Eficiencia de clarificación: } E_c \times \frac{JA \quad InsJA \quad Z \quad JC \quad InsJC}{JA \quad InsJA} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$3. \text{ Retención en el filtro } R_f \times \frac{CZA \quad InsCZA \quad Z \quad JF \quad InsJF}{CZA \quad InsCZA} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$4. \text{ Por ciento de recirculación de insoluble: } Pr \times \frac{JF \quad InsJF}{JM \quad InsJM} 100\% \dots\dots\dots (2.29)$$

2.5: Otros indicadores de valoración del proceso.

Para realizar la valoración del proceso se hace primero la caracterización estadística de las variables teniendo en cuenta los siguientes parámetros estadísticos: media, desviación estándar, valores de los coeficientes de *Asimetría* y *Curtosis* y coeficiente de variación; el valor de este último define si los datos están bien agrupados alrededor de la media de la muestra, es decir, si la media es representativa de la muestra.

Luego se tienen en cuenta el cumplimiento de las normas de operación de las variables para cada etapa. Estas normas son las dadas por el Manual de Operaciones (2013) y otros autores.

También se tienen en cuenta otros parámetros que permiten valorar a cada área en su conjunto. En el área de extracción para determinar la eficiencia de esta etapa se calculan el porcentaje de pérdidas de Pol, el porcentaje de extracción de Pol y el porcentaje de extracción de jugo, mostrados en las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.8 respectivamente.

$$\% \text{Perdidas} \times \frac{RL * PolRL}{CM * PolCM} 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\% \text{Extracción} \times \frac{JM * PolJM}{Cm * PolCm} 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\% \text{Extracción Jugo} \times \frac{JM}{CM} 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Donde:

% Perdidas: Por ciento de pérdidas de Pol.

% Extracción: Por ciento de extracción de Pol.

% Extracción Jugo: Por ciento de extracción de jugo.

La relación flujo de agua de imbibición-fibra en caña se determina por la ecuación 2.9.

$$\lambda \times \frac{AI}{CM * F_{CM}} 100\% \dots\dots\dots (2.9)$$

Donde:

λ : Relación entre el flujo de agua de imbibición y la masa de caña.

2.6: Valoración económica

Se fundamenta en determinar la repercusión que tiene para el proceso desde el punto de vista económico las diferentes acciones productivas que se toman desde el punto de vista técnico. Se determina que repercusión tienen las acciones antes mencionadas en la recuperación de sacarosa, a partir de las pérdidas de la entidad en un período de trabajo de un mes. Para ello se tienen en cuenta los precios más actuales de cada uno de los productos involucrados en el análisis.

Conclusiones parciales del capítulo.

1. El análisis estadístico realizado mediante el paquete *STATGRAPHICS* garantiza que las variables seleccionadas puedan ser usadas para el análisis tecnológico en este estudio.
2. Los balances de masa en las diferentes áreas son muy útiles para conocer los diferentes flujos de producción que no se pueden cuantificar por falta de instrumentación en el proceso.
3. Para evaluar la disciplina tecnológica resulta conveniente emplear las cartas de control, las normas de procesos y los criterios de los especialistas en el tema.

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos en la aplicación de las diferentes metodologías de cálculo descritas en el capítulo 2, con el propósito de darle cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos en la investigación.

En este capítulo se analizan las etapas de extracción y purificación en cuanto al comportamiento de las variables de una manera general. Se hace referencia al cumplimiento de las normas de las variables más importantes para cada etapa.

3.1: Análisis estadístico de las principales variables operacionales de las etapas de extracción y purificación.

A partir de la metodología expuesta en el capítulo 2, se realiza la caracterización estadística de las principales variables operacionales en las etapas de extracción y purificación. Para el desarrollo de estos cálculos, se utiliza el software Statgraphic Plus versión 5.0, con la finalidad de detectar las desviaciones significativas de las variables de operación del proceso.

Este epígrafe presenta el comportamiento estadístico de las distintas variables muestreadas durante veintisiete días de trabajo en las áreas, así como un análisis global de las variables haciendo referencia a las normas establecidas por los diferentes autores. Todos los datos muestreados se presentan en el Anexo 2.

En las tablas 3.1 y 3.5 se muestran los resultados de la media, el coeficiente de variación, la desviación estándar y los valores de los coeficientes de *Asimetría* y *Curtosis*, correspondientes al período que se analiza (1 al 28 de febrero del 2018).

3.1.1: Análisis del comportamiento estadístico de las variables del área de extracción.

Ver los valores de las variables en los 27 días reflejados en el Anexo2, tabla1.

Una vez obtenidos los valores de las variables se realiza la caracterización estadística de las mismas. Esto se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Caracterización estadística de las variables en el área de extracción.

Variables analizadas	Promedio	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación (CV) [%]	Varianza	Coefficiente de Asimetría	Coefficiente de Curtosis
caña molida (t/h)	134,5190	10,9299	8,1252	119,4640	-0,9449	-0,7785
Fibra en caña (%)	15,2574	0,1078	0,7063	0,0116	0,8608	-0,3694
Pol en caña (%)	13,0000	0,5446	4,1893	0,2966	-0,1013	-0,0918
Brix Jugo de la 1ra extracción (°Bx)	17,3841	0,5284	3,0396	0,2792	-0,8259	-0,4025
Pol de jugo mezclado (%)	11,0193	0,1919	1,7411	0,0368	-0,9173	-0,4980
Brix de jugo mezclado (°Bx)	13,0804	0,2050	1,5676	0,0420	-0,2577	-0,7426
pH de jugo mezclado	4,9622	0,2499	5,0360	0,0624	-1,7033	0,1099
Agua de Imbibición (m ³ /h)	45,8000	5,4800	11,9651	32,3500	0,2246	0,7754
Temperatura del agua de imbibición (°C)	79,0000	0,0409	0,0518	0,0016	-0,7993	2,0000
Fibra en bagazo (%)	46,0000	0,2620	0,5695	0,0686	-2,0133	-0,2823
Humedad en bagazo (%)	48,6204	0,3550	0,7301	0,1263	1,7097	0,0744
Pol en bagazo (%)	1,7500	0,0627	3,5826	0,0039	2,0000	1,0638
% Materia extraña	12,4237	0,2232	1,7965	0,0498	-0,4979	-0,5675
Presión del último molino (kg/cm ²)	205,9810	5,7925	2,8121	33,5500	-1,3231	-1,2997

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros operacionales analizados en la tabla 3.1, para las variables del área de extracción, incluye los valores de tendencia central, de variabilidad, y de desviación estándar. De interés particular aquí está la asimetría y curtosis estandarizada que pueden usarse para determinar si la muestra viene de una distribución normal. Si los valores de estas estadísticas estuvieran fuera del rango de -2 a +2 indican que no presenta una distribución normal y tendería a invalidar cualquier prueba estadística. En este caso, el valor asimetría estandarizada y curtosis estandarizada está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. También, se puede apreciar cómo en los días analizados el coeficiente de variación para cada una de las variables, la gran mayoría de las variables analizadas presenta un coeficiente de variación menor al 4% y el resto muestra valores entre 8 y 12%, lo que confirma la presencia de poca dispersión en la gran mayoría de los datos utilizados.

3.1.2: Análisis de las variables tecnológicas del área de extracción.

Para efectuar el análisis de estas variables del proceso se realizaron cartas de control a cada variable, con el fin de determinar si existen desviaciones

significativas en las variables de operación de la etapa, unido a los valores de las normas del proceso y los criterios de los diferentes especialistas.

En la tabla 3.2, se muestra los resultados de las cartas de control:

Tabla 3.2: Resultados de la aplicación de las cartas de control.

Variables	Control del proceso
caña molida (t/h)	Fuera de control
Fibra en caña (%)	En control estadístico
Pol en caña (%)	Fuera de control
Brix Jugo de la 1ra extracción (°Bx)	Fuera de control
Pol de jugo mezclado (%)	Fuera de control
Brix jugo mezclado (°Bx)	Fuera de control
pH de jugo mezclado	Fuera de control
Agua de Imbibición % en caña (%)	Fuera de control
Temperatura agua de imbibición (°C)	Fuera de control
Fibra en bagazo (%)	Fuera de control
Humedad en bagazo (%)	Fuera de control
Pol en bagazo (%)	En control estadístico
% Materia extraña	Fuera de control
Presión del último molino (kg/cm ²)	Fuera de control

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3.2 se puede observar que de las 14 variables a las cuales se le realizaron carta de control se obtuvo que solo 2 están en un estado de control estadístico, lo que representa un 14,3 % del total analizado; y 12 están fuera de control, que representan un 85.7 %, cuyos resultados fueron obtenidos con el software STATGRAPHICS Plus versión 5.0., con un nivel de confiabilidad entre un 90 y 99 %. Los resultados de cada una de las cartas de control se muestran en el Anexo 3. De esta forma se demuestra que el proceso está fuera de control en su mayoría, por lo cual necesita revisiones y ser sometido a cambios. Entre los principales cambios que se pueden realizar están colocar los instrumentos de medición necesarios, que realicen las mediciones de manera directa y evitar errores; también deben ser colocados en los lugares adecuados para evitar falsear mediciones y tener mejores registros que a su vez permiten tener mayor control de este.

) Análisis de la Caña molida.

Las cartas de control obtenidas para la variable mencionada muestran los siguientes resultados.

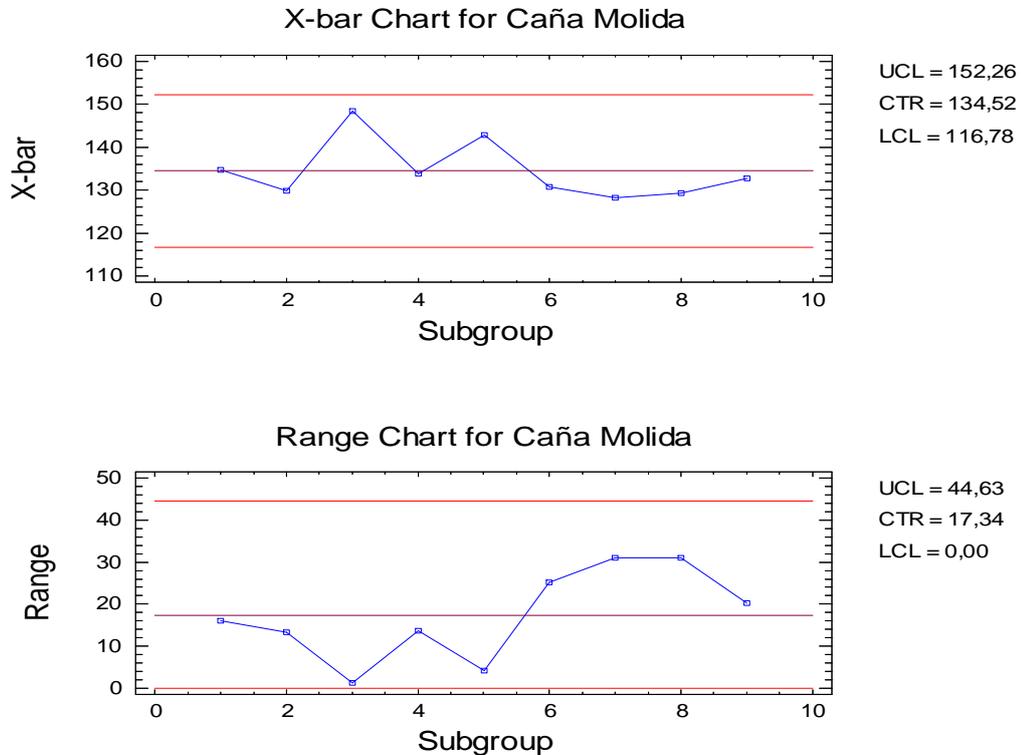


Fig. 3.1: Cartas de control de media y rango para la caña molida.

Los datos vienen de una distribución normal con una media igual a 134.52 t/h y un coeficiente de variación igual a 8.13 %. En la primera carta se puede observar que los puntos están relativamente cerca del límite superior por lo que el proceso está fuera de control, mientras que la segunda se puede observar los puntos están relativamente cerca del límite inferior y existen cinco puntos consecutivo del mismo lado de la línea central. Lo que demuestra que la caña molida exhibe un comportamiento fuera de control, para un nivel de confiabilidad de 99 %.

La eficiencia de la producción de azúcar crudo depende en gran medida de que se logre moler caña establemente y en cantidades próximas a la norma potencial. Esta primera variable del área de extracción se encuentra fuera de control según se mostró y comentó anteriormente. Además se puede apreciar en el periodo estudiado que la cantidad de caña molida se encuentra entre 110

y 149 ton/h, muy lejos de la norma potencia que es de 187 ton/h, para un 100 % de incumplimiento. Como se pudo comprobar esta primera violación de la disciplina tecnológica afecta el sistema de generación de vapor y por tanto la generación eléctrica de este central azucarero, al no disponerse de la cantidad de bagazo necesaria. Pudo también contratarse que se afectó el plan de producción al no obtenerse la cantidad de azúcar crudo para el periodo analizado. No se trata de recomendar molida por encima de las capacidades nominales pues es seguro que la capacidad de producción del central es insuficiente para procesar todo el volumen de jugo y sería también un incumplimiento tecnológico.

) Fibra en caña.

Es una variable importante para el proceso por su repercusión, pero obviamente no es una variable de control, de manera que en este análisis se tiene en cuenta lo que señalan los especialistas y lo que reporta el manual operacional para definir su influencia en el proceso.

Presenta valores entre 14 y 16 %, y la mayoría de los días fue alrededor de 15 %. Es necesario recordar que altos contenidos de fibra en caña van a influir en las pérdidas de sacarosa en el bagazo. A mayor cantidad de fibra en caña se origina una gran masa de bagazo, que va acompañada de un contenido de sacarosa, de manera que las pérdidas en bagazo aumentarían a mayor valor de esta variable. Sin embargo esta variable cumple con la norma establecida por el Manual de Operaciones (2013) que es de 9 a 15 %. Casanova y Alonso (2006) refieren valores de 13,5 a 14,5 % y Carrazana (1987) da un rango más amplio, el cual se encuentra de 9,0 a 16,5 %. De manera que los valores reportados se encuentran dentro de los valores planteado por los diferentes autores, además de cumplir con la norma, por lo que si las pérdidas de sacarosa en bagazo se incumplieran o fueran altas se debería solo a una alta Pol en bagazo y no a su masa.

La Pol en caña al igual que la fibra como es lógico no es una variable de control sino otra especificación de la calidad de la materia prima, que en gran medida decide la eficiencia económica de este proceso, pues azúcar que no entra no puede obtenerse mediante el proceso de producción. En este periodo presenta

valores entre 11 y 13 %. Los mayores valores se concentraron alrededor del 12 %, siendo la media de 13 %. La norma establecida por el Manual de Operaciones (2013) para esta variable es entre 10 y 16 % por lo que se comportó dentro de este rango. Otros autores como Casanova y Alonso (2006) reportan valores de 12 a 14 %, un rango mucho más pequeño que el anterior. Habiendo cumplido la materia prima con esta especificación, la eficiencia estará garantizada siempre que se logre un buen recobrado.

) Brix del jugo de la primera extracción.

El Brix del jugo de la primera extracción muestra valores entre 16 y 18 °Bx lo cual se ajusta al rango normado por el Manual de Operaciones (2013) para esta variable que es entre 15 y 25 °Bx, sin embargo sería preferible que el valor máximo de los datos reportados se acercaran al máximo reportado por la norma. Otros autores como Carrazana, (1987) tiene como referencia para el primer jugo extraído valores de 16,5 a 23 °Bx. Esto indica que se dispone de una buena cantidad de sólidos solubles acompañada de una buena cantidad de sacarosa.

) Pol del jugo mezclado.

El Manual de Operaciones (2013), establece valores de Pol en el jugo mezclado de 9 hasta 17 %. La Pol del jugo mezclado se encuentra fuera de control estadístico pero presenta valores que se encuentran dentro de rango normado, los valores de máximo y mínimo que se reportan 10 y 11% respectivamente.

Es criterio de la autora de que este valor de Pol de jugo mezclado aunque cumple con la norma es un valor que puede ser mejor y acercarse al valor máximo de la norma que es 17 % o al menos al valor de la Pol en caña. Su valor está comprometido con la cantidad de agua de imbibición añadida. Casanova y Alonso, (2006) refieren valores de 11,5 a 13,5 %, respectivamente y Hugot (1986), se refiere a valores normales de Pol en jugo mezclado de 12,88 %, por lo tanto el valor obtenido está por debajo de lo establecido por esta bibliografía.

) Brix del jugo mezclado.

Según el Manual de Operaciones (2013) el Brix del jugo mezclado debe oscilar entre 13 y 15 °Bx. Otros autores plantean (Casanova y Alonso, 2006) valores de 13,5 a 16,5 °Bx y según Hugot (1986) el Brix en el jugo mezclado debe encontrarse de 14 – 15 °Bx, rango algo superior a los anteriores. Dado que la

media de ésta variable para el periodo muestreado es de 13.08 °Bx, se puede asegurar que ésta variable se acerca a lo establecido por los especialistas y cumple con el valor normado.

) pH del jugo mezclado.

Morales, (2010), plantea que el pH en el jugo mezclado presenta un carácter ácido (aproximado a 5,2), el Manual de Operaciones (2013), establece que este parámetro debe estar en el rango de 5,0 a 5,6, él tiene como media, en los días analizados, es de 4.96, valor no se encuentra en norma según la bibliografía citada. Según Jenkins, (1988) y Morrel, (1989), cuando el pH es ácido favorece que pueda ocurrir la inversión de la sacarosa, fenómeno no deseado en el proceso, por lo que es necesario su neutralización lo antes posible. Es esta la razón por lo que se considera que la alcalización en frío y la fraccionada son las que se recomiendan.

) Agua de imbibición.

Durante el muestreo realizado, sus valores se encontraron entre 34.09 hasta 60.2 m³/h. Según González (2010), los valores de agua de imbibición % en caña deben encontrarse entre un 18 y 22 %, en este caso el valor promedio se encuentra alrededor de 34.05 %, por lo que según el criterio anterior este valor está por encima de la norma. Según el criterio de Pedrosa (1983), los valores de agua de imbibición % en caña deben encontrarse entre el 25 y 30 %, el valor promedio se encuentra por encima de la norma, esto provoca una mayor incorporación de agua al proceso, lo cual demanda un mayor consumo de vapor en la etapa de evaporación que podría provocar un desbalance energético del central azucarero. Es bueno calcular este parámetro referido a la fibra en caña, se observa que el valor es de un 300.18 % es superior a lo planteado por González (2010) que refiere como norma un 200 %, (Rein ,2007) reporta que la extracción de trenes de molinos se incrementa rápidamente con el aumento de la tasa de imbibición hasta al menos 250-280 % fibra, aunque continúan siendo posibles ganancias significativas de extracción hasta aproximadamente 350 % en fibra ,pero la autora considera que estas últimas cifras sería, comprometiendo el balance energético de la industria.

) Temperatura del agua de imbibición.

El comportamiento de la temperatura del agua de imbibición durante los días analizados fue desde 78.89 hasta 79.09 °C. La norma para esta variable en el Manual de Operaciones (2013) es de 60 a 80 °C. Otros autores como Pedrosa (1975) recomiendan valores de temperatura de 75 a 80 °C, lo cual facilita la extracción y evita el desarrollo microbiano. La temperatura no tiene ningún efecto mientras no llegue a los 60 o 70 °C, por debajo de estos últimos valores no se logra el efecto deseado. Hugot (1986) y Posada (1987), recomiendan que la temperatura del agua de imbibición no debe exceder de los 85°C para evitar la incorporación de las ceras al jugo. Como se puede apreciar los valores cumplen con la norma establecida. Si se sigue el criterio de los especialistas se puede afirmar que altos porcentajes de extracción, logran una extracción considerable de la sacarosa disuelta en el jugo y retenida en el bagazo. Se posee el criterio de que la temperatura del agua de imbibición responde a los fenómenos de inversión, desarrollo microbiano y extracción de ceras, pero no tanto a la extracción de la sacarosa que de hecho se encuentra presente en el jugo diluido y no es necesario disolverla. Por lo que se recomienda temperatura que no exceda los 80 °C.

) Fibra en bagazo.

Los valores reportados en el periodo están entre 45 y 46 %, (Casanova y Alonso 2006) mencionan valores de fibra en bagazo de 47 a 49 %, mientras que (Carrazana, 1987) ofrece valores de 43,0 a 47 %, siendo este un rango que satisface el criterio de la mayoría de los especialistas. Resulta de más interés analizar la humedad del bagazo que es una variable de control y se encuentra normada.

) Humedad del bagazo.

Según (Junco,2011) la presión en el último molino debe garantizar una humedad en el bagazo algo inferior al 50 %, mientras que Hugot (1986) señala que el % de humedad debe ser de 40 % y para molinos deficientes 50 %, por otra parte (Ordóñez,2004) da un rango de 49 a 51 % y (Carrazana, 1987) de 46 a 52 %, si la media de esta variable durante el tiempo muestreado fue de 48.62 % podemos decir que se encuentra dentro del rango que señalan los especialistas y que lo

dan como aceptable, aunque se encuentra muy próximo al límite. Teniendo en cuenta que este es el combustible que se usa en la generación de vapor es de vital importancia el correcto control tanto del proceso como con respecto a la norma de esta variable.

) Pol en bagazo.

La Pol del bagazo es una variable muy importante a controlar, pues es sacarosa que se pierde en el proceso y no se puede recuperar más. En el Manual de Operaciones (2013) se dan valores de Pol en bagazo 1,5 a 2,5 %. Hugot (1986), considera que este valor debe estar entre 2 y 2,5 %, Honing, (1987), plantea que en molinos bien ajustados y con una imbibición eficiente deben esperarse valores de Pol en bagazo entre 3 y 3.5 % y aún inferiores, haciendo mínimas las pérdidas en bagazo. El análisis de este parámetro con respecto a la norma indica que está entre los límites permisible ya que la media de este para el periodo estudiado es de 1.75 % y la norma plantea un máximo de 2.5 %, por lo que no se pierde azúcar por este concepto al menos no se pierde más allá de lo normado.

) Materia extraña.

La materia extraña presenta variabilidad, valores de entre 12.01 y 12.82 %. Valores altos de esta variable perjudican al proceso pues entran, junto con la caña un grupo de impurezas que repercuten en la calidad del producto final y además representa un volumen de materia que entra sin azúcar y se ira con un contenido de la azúcar en los lodos de la sedimentación. El límite máximo normado por el Manual de Operaciones (2013) se encuentra en el orden del 3 al 5 % de materia extraña, por lo que los valores analizados están muy elevados.

) Presión del último molino.

Un factor importante a controlar es la presión del último molino, la cual se debe encontrar en 3100 psi (218 kgf/cm²), los valores oscilan entre 196 y 210 kgf/cm² y todos se encuentran por debajo de lo normado. El aumento de la presión en el último molino del tándem debe garantizar la disminución de la humedad en el bagazo, lo que es importante para la generación de vapor en las calderas, pues mientras menor sea la humedad, mayor será la combustión de este. Los resultados muestran una contradicción entre el incumplimiento de la presión en

el último molino y el cumplimiento de la humedad del bagazo, por lo que deben ser tomados los resultados de la humedad del bagazo con discreción.

3.2: Evaluación del área de extracción.

En este epígrafe se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los balances de masa, para los cálculos se emplea la herramienta Microsoft Excel 2010, en donde se programan las ecuaciones, de los cálculos realizados para la determinación de los indicadores de eficiencia y las pérdidas en el área de extracción. En la siguiente tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos en el área:

Tabla 3.3: Resumen de los resultados en el área de extracción.

Variables del área de extracción	Rango del comportamiento	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Norma	% de cumplimiento	Cumplimiento de la disciplina tecnológica
caña molida (t/h)	35,62	134,52	110,21	149,03	188 ton/h	0,00	No
Fibra en caña (%)	0,43	15,26	15,04	15,47	9 al 16 %	100,00	Si
Pol en caña (%)	2,21	13,00	11,96	14,17	10 al 16%	100,00	Si
Brix Jugo de la 1ra extracción (°Bx)	2,03	17,38	16,30	18,33	15 a 25 °Bx	100,00	Si
Pol de jugo mezclado (%)	0,62	11,02	1,67	11,29	9 al 16 %	100,00	Si
Brix jugo mezclado (°Bx)	0,74	13,08	12,69	13,43	13 a 15 °Bx	70,00	No
pH de jugo mezclado	0,95	4,96	4,31	5,26	5 al 5,6	55,00	No
Agua de Imbibición % en caña (%)	45,65	61,14	34,05	60,19	25 al 30 %	0,00	No
Temperatura agua de imbibición (°C)	0,20	79,00	78,89	79,09	60 al 80 °C	100,00	Si
Fibra en bagazo (%)	0,85	46,00	45,41	46,26	47 al 49 %	0,00	No
Humedad en bagazo (%)	1,36	48,62	48,08	49,44	menor que 50%	100,00	Si
Pol en bagazo (%)	0,27	1,75	1,65	1,92	1,5 al 2,5 %	100,00	Si
% Materia extraña	0,81	12,42	12,01	12,82	3 al 5 %	0,00	No
Presión del último molino (kg/cm ²)	14,07	205,98	196,86	210,93	218 kgf/cm ²	0,00	No

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados mostrados anteriormente se puede decir que se está trabajando con un ritmo de molida bajo, con una caña que posee un porcentaje de Pol y de fibra en caña comunes para esta etapa de la contienda, con una buena extracción de Pol de un jugo que se considera más ácido de lo permisible, que para ser obtenido se aplicó una excesiva agua de imbibición con una temperatura adecuada. Se reporta un porcentaje de fibra y humedad del bagazo que satisfacen lo normado a pesar de este exceso de agua de imbibición y de una presión inadecuada en el último molino. Apoyándose en los valores medios

de la humedad y fibra del bagazo, se considera que uno de los dos parámetros resulta poco confiable, se considera que es la humedad.

Para terminar de ofrecer un criterio de la disciplina tecnológica en esta área es necesario observar que de las 14 variables estudiadas 7 poseen un 100 % de cumplimiento, 5 tienen un 100 % de incumplimiento y 2 que tienen un incumplimiento parcial. Se considera entonces que el área de extracción no cumple con la disciplina tecnológica del proceso.

Como principales consecuencia se debe esperar afectación en la generación de vapor, el balance energético, y las pérdidas indeterminadas. Estos valores suponen que no se confronten problemas en la extracción de la Pol debido a la gran cantidad de agua de imbibición empleada y que la extracción de jugo mezclado supere el 100 %, como se comprobó más adelante en la investigación.

3.2.1. Análisis de los resultados obtenidos en los balances de masa.

En el Anexo 2, tabla 1; se muestran las variables operacionales de los 27 días del área utilizados en los balances de masa. Después de la realización de los balances de masa, se pudieron determinar los flujos correspondientes a cada una de las corrientes desconocidas en el proceso, y se muestran en el Anexo 4, Tabla 1.

A continuación se muestran los resultados globales de los indicadores de eficiencia del área en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: *Indicadores de Eficiencia del área de extracción.*

Indicadores de eficiencia en el Área de Extracción	Valor
% Extracción de Pol en molinos (%)	95,55
% Pérdidas en los molinos (%)	4,45
% Extracción de jugo mezclado (%)	112,81
λ (Relación AI - fc)	3,00

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente y obtenidos mediante el balance de masa, se emite un criterio acerca de la eficiencia del área. La extracción de Pol, así como las pérdidas en bagazo satisfacen los valores normados; sin embargo se posee el criterio de que ambos parámetros de eficiencia pudieran mostrar valores aún mejores si se tiene en cuenta la gran

dilución de jugo que se produce a partir de un exceso de agua de imbibición, que como se muestra en la tabla excede el 100 % y que como se explicó en este trabajo compromete el balance energético. El Manual de Operaciones (2013) el % de extracción de jugo mezclado debe estar entre 95 y 100 %.

Hugot, (1986), señala que la extracción aumenta muy rápidamente cuando varía de 0 a 1, aún bastante rápido de 1 a 2 y más lentamente por encima de 2. No se obtiene ninguna ventaja al sobrepasar = 3. Atendiendo a su criterio y al valor reportado en tabla anterior se considera que la cantidad de agua de imbibición empleada es incorrecta.

3.3: Análisis del área de purificación.

En este epígrafe se hace un análisis del comportamiento estadístico de las variables. Se analizan de una forma global, teniendo en cuenta el cumplimiento de las principales normas y viendo su influencia para el proceso. En el Anexo 2, Tabla 2 se presentan los datos muestreados en esta área para las 27 evaluaciones realizadas.

3.3.1: Análisis del comportamiento estadístico de las variables del área de purificación.

En la tabla 3.5 de muestra la caracterización estadística del área de purificación:

Tabla 3.5: Caracterización estadística de las variables en el área de purificación.

Variables analizadas	Promedio	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación (CV) [%]	Varianza	Coefficiente de Asimetría	Coefficiente de Curtosis
Concentración de la lechada de cal (°Bx)	7,7085	0,2670	3,4641	0,0713	-1,0590	-1,0927
Brix jugo alcalizado (°Bx)	13,0863	0,1157	0,8841	0,0134	-0,6210	-0,7995
pH de jugo alcalizado	6,9789	0,0340	0,4873	0,0012	0,1238	0,2261
Temperatura de salida de los calentadores (°C)	105,8200	1,8208	1,7207	3,3153	0,0123	-0,2812
Brix jugo clarificado (°Bx)	13,1600	0,1400	1,0638	0,0192	1,2474	-0,1210
Pol jugo clarificado(%)	11,0800	0,1590	1,4350	0,0254	0,4432	0,0775
pH de jugo clarificado	7,0156	0,0221	0,3146	0,0002	-0,6395	-1,5291
Brix jugo filtrado (°Bx)	11,5878	0,2129	1,8371	0,0453	0,2636	-0,4899
Pol jugo filtrado(%)	8,9982	0,2079	2,3109	0,0432	0,1692	0,0250
Insolubles en lodos (%)	9,6600	0,9000	9,3168	2,3674	1,7076	-0,7396
Insolubles en jugo filtrado (%)	3,4300	0,3000	8,7464	0,6606	1,0718	-0,2340
Insoluble en jugo clarificado (%)	0,9600	0,1123	11,6979	0,0418	-0,8965	0,5281
Insolubles en jugo mezclado (%)	0,4500	0,0245	5,4524	0,0006	0,7390	0,3049
Insoluble en jugo alcalizado (%)	2,9100	0,2300	7,9038	0,0523	-0,1195	-0,7528
Pol en cachaza (%)	2,4030	0,0408	1,6995	0,0017	2,0000	1,7155
Humedad de la cachaza (%)	67,5741	2,4360	3,6050	5,9343	-1,6572	0,1455
Cachaza% caña(%)	4,2682	0,4789	11,2203	0,5249	-0,4463	-0,2758
Presión de bajo vacío(mmHg)	9,6667	0,4804	4,9695	0,2308	-1,5897	-1,6246
Presión de alto vacío(mmHg)	16,9259	0,8286	4,8956	0,6866	0,3064	-1,6227

Fuente: Elaboración propia.

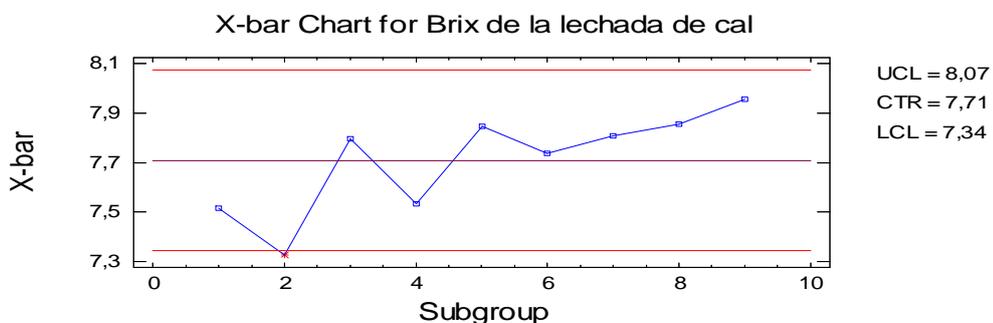
Las variables analizadas en la tabla 3.5, para las variables del área de purificación, incluye los valores de tendencia central, de variabilidad, y de desviación estándar, los valores pequeños de desviación estándar, lo que indica la poca dispersión de los datos respecto al valor de la media aritmética. De interés particular aquí está la asimetría y curtosis estandarizada que pueden usarse para determinar si la muestra viene de una distribución normal. Si los valores de estas estadísticas estuvieran fuera del rango de -2 a +2 indican que no presenta una distribución normal y tendería a invalidar cualquier prueba estadística. En este caso, el valor asimetría estandarizada y curtosis estandarizada está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal. También, se puede apreciar cómo en los días analizados el coeficiente de variación para cada una de las variables, la gran mayoría de las variables analizadas presenta un coeficiente de variación menor al 4 % y el resto muestra valores entre 8 y 12 %, lo que confirma la presencia de poca dispersión en la gran mayoría de los datos utilizados.

3.3.2: Análisis de las variables tecnológicas en el área de purificación.

Los resultados de las cartas de control, cuyos resultados fueron obtenidos con el software STATGRAPHICS Plus versión 5.0., con un nivel de confiabilidad entre un 90 y 99 %, muestran que las 11 variables están fuera de control. Estos resultados se muestran en el Anexo 3. Al estar el proceso, en general, fuera de control, se necesita ejecutar su evaluación.

) Análisis del el Brix de la lechada de cal.

Los resultados obtenidos del análisis de la variable mencionada se muestran a continuación.



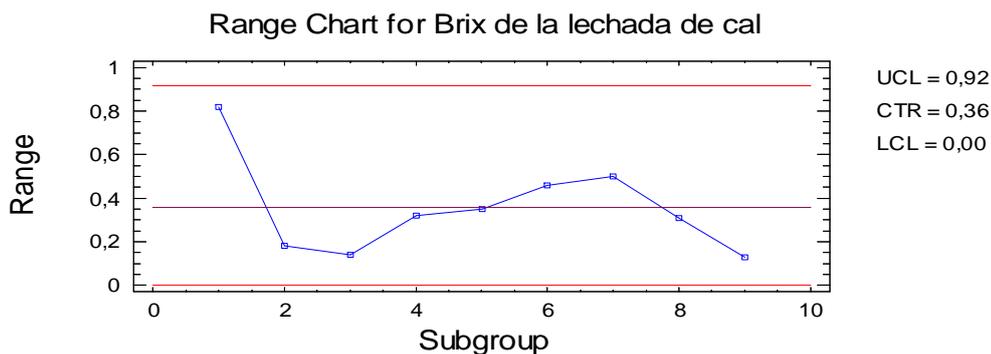


Fig. 3.2: Cartas de control de media y rango para el Brix de la Lechada de cal.

Los datos vienen de la distribución normal con una media igual a 7.70 °Bx y un coeficiente de variación igual 3.46 %. En la figura 3.2, se puede observar que en la carta de media se encuentran puntos por fuera del límite inferior, y en la segunda carta se encuentran varios puntos muy cerca de los límites inferior y superior. Lo que demuestra que el Brix de la Lechada de cal exhibe un comportamiento fuera de control, para un nivel de confiabilidad de 99 %.

La concentración de la lechada de cal durante el muestreo realizado fue de 7.70 °Bx, por lo que está en el rango establecido por el Manual de Operaciones (2013) que es de 3.6 a 7.20 °Bx y coincide también por lo planteado por Herrera (2011). Sin embargo, Arca et al (1988), afirma que la concentración debe ser de 5 a 6 °Bx. En este caso se está adicionando una cantidad de lechada de cal mayor que la requerida, lo cual puede afectar tanto a los reductores presentes en el jugo como a el proceso de transferencia de calor debido a las incrustaciones, también afecta al color del jugo. Esta variable se encuentra fuera de control estadístico e incumple con la norma.

) pH jugo alcalizado.

El Manual de Operaciones (2013) establece para la alcalización fraccionada que el jugo pre alcalizado debe tener un pH de 6.5 a 6.8 en frío y la rectificación de la alcalización hasta un pH de 7.8 a 8.0. Dado que la variable presentó una media de 8.16 durante el periodo muestreado no se encuentra dentro de los límites planteados por los especialistas cuando se trata de una alcalización fraccionada, debido a que es ligeramente superior al límite máximo.

) Temperatura de salida del jugo alcalizado.

Para Manual de Operaciones, (2013) la temperatura de salida de los calentadores debe mantenerse en 103 °C. Sobrepásese este límite solo en casos excepcionales de presencia de tierra y exceso de bagacillo. Según los criterios de Pedrosa (1983) y Hugot (1986) la temperatura a la que debe calentarse el guarapo no debe ser superior a unos 4 °C más que el punto de ebullición de éste, alrededor de 103°C, con ello no se desperdiciará calor, ni se producirían compuestos químicos indebidos, que puedan formarse a mayores temperaturas.

La media presentada por esta variable durante el periodo estudiado fue de 105.82°C lo que no cumple con los criterios de los especialistas y la normativa del central pero garantiza que durante el proceso de clarificación no se formen turbulencias en este equipo que destruyan los flóculos con el fin de obtener un jugo claro y brillante. Aun cuando el tiempo de permanencia del jugo a esta temperatura no es grande siempre afectara en alguna medida la composición del jugo en este caso se considera que pueda aumentar la destrucción de reductores.

) Brix del jugo clarificado.

El Manual de Operaciones (2013) refiere valores entre 14 y 18 °Bx. Carrazana, (1987) ofrece valores entre 13 y 17 °Bx, mientras que (Matute, 2012) refleja un rango más pequeño de 12 a 14 °Bx y (Junco, 2011) da un rango de 12 a 16 °Bx.

La variable presentó una media de 13.16 °Bx durante el periodo muestreado, no se encuentra dentro de los límites planteados por el Manual de Operaciones (2013); se considera entonces que solo disminuyendo la cantidad de agua de imbibición se podrá obtener un mejor Brix y no afectar al área evaporación.

) pH jugo clarificado.

El pH del jugo clarificado, durante el muestreo realizado a esta variable fue de 7.01, El Manual de Operaciones (2013) establece que para jugo clarificado el pH debe estar entre de 6.5 a 7.1, por lo que está dentro de lo normado; Carrazana (1987) y Matute (2012) plantean que es de 6 a 7. Arca et a (1988) presenta un rango de 7 a 7,2, aunque plantea que en determinadas ocasiones con un pH de 6,8 a 7 se obtienen buenos valores de eficiencia.

Los pH altos de jugo clarificado causan destrucción de azúcares, aumento de la viscosidad en todos los productos del proceso, reducción del agotamiento de las mieles finales, aumento de la producción de mieles, altas pérdidas de sacarosa en miel final e incremento del color del azúcar durante su almacenaje. Para pH bajos, las pérdidas de azúcar por inversión serán altas, la clarificación será deficiente, provoca jugos turbios y la calidad del azúcar será afectada.

) Brix del jugo filtrado.

Según Díaz, (2002) un valor de 12 °Bx en el jugo filtrado es el adecuado en el proceso azucarero, según el Manual de Operaciones (2013), el rango en que debe estar este parámetro es de 12 a 15 °Bx, el resultado que se obtuvo como media en los días analizados fue de 11.58 °Bx, este valor se encuentra por debajo de lo normado. Un aumento o disminución de este parámetro está en dependencia de la cantidad de agua de lavado que se emplea en el filtro, cuanto menor sea la cantidad de agua mayor es el Brix, por eso el valor de este debe ser capaz de garantizar las menores pérdidas de sacarosa en la cachaza, pero con el uso de la menor cantidad de agua posible de forma que no se provoque una demanda mayor de vapor para evaporar la misma y no se afecte el balance energético.

) Pol en cachaza.

Aun cuando la variable se encuentra fuera de control, sus valores no sobrepasan en ningún momento el límite normado que es de 1 a 3 % según el Manual de Operaciones (2013), siendo su media de 2.04 % por lo que por este concepto no se afecta el recobrado industrial.

) Humedad en cachaza.

En la humedad de la cachaza, ninguno de los valores en periodo estudiado alcanzan los valores normados que es de 74 a 76 %. Esto es el reflejo de una gran cantidad de agua de lavado que queda retenida en la torta o por deficiencia en las presiones de vacío o por una velocidad del filtro incorrecta.

) Cachaza % caña.

La cachaza % en caña se comporta con un valor medio que está ligeramente por encima de lo normado que es 4%. Esto es indicador de que

la compactación de la cachaza en el clarificador no es la mejor algo que podía ser contactado durante el periodo de operación.

La cachaza es un producto donde se reúne la mayor cantidad de las impurezas que trae el jugo, por lo que está directamente vinculada a la cantidad de materia extraña que entra al proceso sin sacarosa y sale del mismo con sacarosa.

) Presión de bajo vacío.

Para controlar la operación de filtración son las presiones de bajo y alto vacío. Según el Manual de Operaciones (2013) los rangos en las que se deben comportar es de 6 a 10 pulgadas de mercurio (0,20 a 0,33 bar). Durante el muestreo realizado esta variable se encuentra dentro de lo normado. Autores como Arca et a (1988) presentan valores superiores de bajo vacío de 10 a 15 pulgadas de mercurio (0,33 a 0,50 bar). La función del bajo vacío es para poder formar la torta de cachaza sobre las telas perforadas que cubren la superficie del filtro. Si es defectuoso la torta será muy fina, afectándose la capacidad de operación del filtro.

) Presión de alto vacío.

Las presiones de alto vacío, según el Manual de Operaciones (2013) los rangos en las que se deben comportar es de 14 a 18 pulgadas de mercurio (0,47 a 0,60 bar), Arca et a (1988) presentan valores superiores de alto vacío de 15 a 20 pulgadas de mercurio (0,50 a 0,67 bar). La función del alto vacío es para permitir el lavado de la torta mediante la aplicación del agua de lavado y además su otra función es para secar la torta en el último tercio de la revolución del filtro. Si es defectuosa provoca cachaza con alta sacarosa y humedad.

El valor óptimo alto vacío permite la formación de una torta del mayor espesor posible, mantener la humedad de la torta en el rango de 74 a 76 %, asimilar un flujo máximo de agua de lavado equivalente al 150 % de la cachaza y que la torta sea fácil de desprender por el raspador.

3.4 Evaluación del área de purificación.

A continuación se muestra en la tabla 3.7 un resumen del área de purificación:

Tabla 3.6: Resumen de los resultados en el área de purificación.

VARIABLES DEL ÁREA DE PURIFICACIÓN	RANGO DEL COMPORTAMIENTO	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Norma	% de cumplimiento	Cumplimiento de la disciplina
Concentración de la lechada de cal (°Bx)	0,83	7,71	7,81	8,01	3,6 a 7,20 °Bx	0	No
pH de jugo alcalizado	0,15	8,16	8	8,4	7,8 a 8	33,33	No
Temperatura de salida de los calentadores (°C)	7,02	105,82	102,48	109,5	hasta 103 °C	7	No
Brix jugo clarificado (°Bx)	0,57	13,16	12,93	13,5	14 a 18 °Bx	0	No
pH de jugo clarificado	0,04	7,02	7,00	7,04	6 a 7	100	Si
Brix jugo filtrado (°Bx)	0,82	11,59	11,18	12,00	12 a 15 °Bx	0	No
Pol en cachaza (%)	0,18	2,40	2,34	2,52	1 a 3 %	100	Si
Cachaza% caña(%)	2,87	4,27	2,55	5,42	menor que 4 %	40,74	No
Humedad de la cachaza (%)	8,50	67,57	62,00	70,50	74 a 76 %	0	No
Presión de bajo vacío(mmHg)	1,00	9,67	9,00	10,00	6 a 10 mmHg	100	Si
Presión de alto vacío(mmHg)	2,00	16,93	16,00	18,00	14 a 18 mmHg	100	Si

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados mostrados anteriormente se puede decir que se está trabajando con un jugo ligeramente por encima de la alcalización debida y que es calentado por encima de la temperatura establecida por lo que se puede inferir que se producirá un aumento en la velocidad de los reductores que pueden repercutir a su vez en el agotamiento, a pesar de que el pH de jugo claro si se encuentra en norma. Las presiones de vacío en filtro son correctas por lo que serán otros factores los que definirán la eficiencia de la operación, que hasta el momento del análisis parece ser adecuada si se tiene en cuenta que cumple con las pérdidas de Pol.

Para terminar de ofrecer un criterio de la disciplina tecnológica en esta área es necesario observar que de las 11 variables estudiadas 4 poseen un 100 % de cumplimiento, 4 tienen un 100 % de incumplimiento y 3 que tienen un incumplimiento parcial. Se considera entonces que el área de purificación no cumple con la disciplina tecnológica del proceso. Aun cuando hay incumplimiento en la disciplina tecnológica los principales parámetros cumplen y las pérdidas en el área se encuentran dentro de los límites posibles que se verá más adelante.

3.4.1: Análisis de los resultados obtenidos en los balances de masa.

En el Anexo 2, tabla 2; se muestran las variables operacionales de las 27 mediciones diarias del área; utilizados en los balances de masa. Después de la realización de los balances de masa con la herramienta de cálculo Microsoft Excel 2010, en donde se programan las ecuaciones; se pudieron determinar los flujos correspondientes a cada una de las corrientes desconocidas en el proceso, como se muestra en el Anexo 4, Tabla 2.

3.4.2: Indicadores de Eficiencia del área de purificación.

Tradicionalmente en la industria azucarera cubana, la eficiencia del área de purificación se fundamenta en que los parámetros de temperatura y pH se encuentren en los valores normados, para evitar las pérdidas de sacarosa por inversión y destrucción de reductores, a estos dos criterios se une las pérdidas de Pol en torta de cachaza, que para muchos es el único indicador de eficiencia. La investigación realizada en este trabajo permite reconsiderar el término de eficiencia y enunciarlo de la siguiente forma:

La eficiencia del área de purificación de un central azucarero, la define las pérdidas de Pol en torta de cachaza y la remoción de insolubles en esta etapa. Todo ello garantizado por el cumplimiento de la disciplina tecnológica.

Atendiendo a esta definición se procede a analizar los resultados obtenidos en el área.

Las pérdidas de Pol en torta de cachaza arrojan un valor medio para este periodo de tiempo de 0.62 %, muy inferior a la norma establecida por lo que en este sentido se puede hablar de una buena eficiencia.

Para completar el análisis de eficiencia se procede a analizar la remoción de insolubles en la etapa, que se muestra en la tabla 3.8:

Tabla 3.7: *Indicadores de eficiencia a partir de la separación de insolubles en el área de purificación.*

Eficiencia en la separación de insolubles	Valor
Eficiencia de purificación (%)	39,52
Eficiencia de Clarificación(%)	67,11
Retención en el filtro (%)	52,30
Por ciento de recirculación de insolubles(%)	47,70

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de clarificación que según los investigadores (Pérez y Díaz, 1989) se comportó entre 40 y 68 %, en esta investigación el valor es muy similar al reportado como límite superior, como se muestra en la tabla anterior.

La eficiencia de separación de insolubles en el filtro, también considerada como retención de insolubles en el filtro posee un valor de 52.3 % muy por debajo del reportado por los mismos investigadores; que encuentran valores entre 64 y 76 % de retención, esto permite decir que el valor que se reporta para él % de recirculación de insolubles en el jugo filtrado de 47.70 % es muy elevado, lo cual afecta al proceso en general al constituir una corriente de recirculación de impurezas que terminará enrareciendo el proceso de producción.

La eficiencia de toda el área de purificación coincide con el valor del límite superior de los autores antes citados que sentencian en su investigación un rango de 32 a 39 %.

Se considera que la eficiencia de clarificación por si sola pudiera garantizar una mayor eficiencia del área en general si los jugos filtrados fueran sacados del proceso. En otras palabras la eficiencia de purificación se considera baja debido al mal trabajo en el filtro, por lo que la atención a esta operación debe ser inmediata.

3.4.3: Estado de la instrumentación en las áreas de extracción y purificación.

Atendiendo a la importancia que tiene para el estudio de la disciplina tecnológica la calidad de los instrumentos de medición, así como las adecuadas mediciones de los parámetros que deciden la eficiencia del proceso se decide en este periodo realizar una evaluación, con el técnico instrumentista, de los mismos, donde se revisaron las fichas técnicas de cada instrumento de medición y el registro de mantenimiento y se realizó una revisión de los mismos directamente en cada área.

A partir de los resultados que se leen en la tabla 3.8, es evidente que la falta de instrumentos de esta industria afecta mucho el éxito de sus resultados, además se detecta que los expedientes de los instrumentos no están correctamente actualizados, otros ni existen, y que los mantenimientos no son efectuados según las normas. Los sistemas de control automáticos en ocasiones están inactivos. La ausencia de los instrumentos que realicen las mediciones de

manera directa afecta el control del proceso. Estos deben ser colocados en los lugares adecuados para evitar falsear mediciones y tener mejores registros.

Tabla 3.8: Estado de la instrumentación de las dos áreas.

Instrumentos de medición	Existe	Bien Instalado	Calibración adecuada y/o Certificación	Calidad de Mto	Calidad de las Mediciones
Manómetro en los molinos	SI	SI	Certificados	E	E
Flujómetro de AI	NO				
Termómetro Ai	SI	SI	SI	B	B
Flujómetro de Jugo Mezclado	NO				
Flujómetro de Lechada de cal	NO				
Areómetros Lechada de cal.	SI		SI	B	B
Flujómetro de Jugo Alcalizado	NO				
Termómetros en los calentadores	Uno en el Rectificador	SI	SI	B	R
Flujómetro para medir vapor	NO				
Manómetro de vapor calentadores	NO				
Flujómetro de Jugo clarificado	NO				

Fuente: Elaboración propia.

3.5: Valoración Económica del Proceso de Producción.

Para la valoración se utilizaron los siguientes indicadores que se ven en la siguiente tabla 3.9:

Tabla 3.9: Indicadores de eficiencia del proceso.

Parámetros del proceso	Valor
Rendimiento (valor diario)	9,56
Recobrado (valor diario)	72,93
% Perdidas en Residuo Leñoso	4,45
% Perdidas en Cachaza	0,62
Perdidas en miel final	10,20
Perdidas indeterminadas	11,80

Fuente: Elaboración propia.

Si se revisan los resultados de la tabla anterior, es evidente que no se incumple con pérdidas de Pol en las dos áreas, aunque el resto de los resultados de los demás parámetros son adversos e indicadores de incumplimiento de la disciplina tecnológica. Es por eso que es necesario proyectarse en el análisis de la siguiente forma: todos los incumplimientos en los parámetros normados, desde el régimen de molienda hasta el último parámetro del área de purificación son responsables del valor del recobrado y rendimiento expuesto anteriormente. Si se sabe que un buen rendimiento para el mes que se realizó la investigación

puede estar entre 11 y 12 % y un buen recobrado entre 80 y 85 %, es posible determinar qué cantidad de azúcar más pudo haberse obtenido y que repercusión económica tendría por concepto de una mejor disciplina tecnológica.

Si se considera que entre el recobrado normado y el alcanzado existe una diferencia del 13 % y este puede ser usado para calcular las toneladas de azúcar base 96 que se producirían por encima del recobrado normado, al hacerlo el resultado es 5 071.4 ton de azúcar. Para el periodo analizado la cantidad de azúcar sería 136 927.8 ton de azúcar, para un precio del azúcar crudo de 276.46 \$/ton, que representa 37 855 059.6 \$.

Conclusiones parciales del capítulo.

1. En la etapa de extracción incumplen con la disciplina tecnológica las siguientes variables: caña molida, Brix jugo mezclado, pH jugo mezclado, agua de imbibición, Pol del jugo mezclado, Fibra en bagazo, % Materia extraña, Presión del último molino.
2. La extracción de Pol, así como las pérdidas en bagazo satisfacen los valores normados.
3. Se emplea un exceso de agua de imbibición que puede comprometer el balance energético de la empresa a estos niveles.
4. Las pérdidas de Pol en bagazo cumplen con las normas establecidas.
5. En la etapa de purificación incumplen con la disciplina tecnológica las siguientes variables: Concentración de la lechada de cal, pH de jugo alcalizado, Temperatura de salida de los calentadores, Brix jugo clarificado, Brix jugo filtrado, Cachaza% caña, Humedad de la cachaza.
6. Se incumple con las normas establecidas para la preparación y adición de la lechada de cal al jugo.
7. Tanto la temperatura del jugo alcalizado y el pH son ligeramente superior del valor normado.
8. El valor del pH del jugo claro se encuentra cerca de la normalidad.
9. Se garantiza bajas pérdidas de Pol en cachaza.
10. La retención de sólidos insolubles en el filtro es muy baja, mientras que en la clarificación es adecuada.

Conclusiones.

1. La evaluación del comportamiento de las principales variables de control de las etapas de extracción y purificación se permitieron definir el comportamiento de la disciplina tecnológica y su repercusión en el proceso.
2. En la etapa de extracción incumplen con la disciplina tecnológica las siguientes variables: caña molida, Brix jugo mezclado, pH jugo mezclado, agua de imbibición, Pol del jugo mezclado, Fibra en bagazo, % Materia extraña, Presión del ultimo molino.
3. En la etapa de purificación incumplen con la disciplina tecnológica las siguientes variables: Concentración de la lechada de cal, pH de jugo alcalizado, Temperatura de salida de los calentadores, Brix jugo clarificado, Brix jugo filtrado, Cachaza % caña, Humedad de la cachaza.
4. Aun cuando la eficiencia de remoción de insolubles es adecuada en el clarificador, la retención de solidos insolubles es baja por lo que también lo es la eficiencia del área de purificación.
5. En el periodo estudiado la disciplina tecnológica de las dos áreas repercuten en el proceso en general afectando su rendimiento y recobrado en una magnitud económica que representa una pérdida de 1 402 \$/d.

Recomendaciones.

1. Continuar trabajando en esta temática de forma que se logre ofrecer un valor integral del comportamiento de la disciplina tecnológica, que permita clasificar a la industria en un nivel dado de cumplimiento de esta.
2. Ponderar las causas que inciden en las violaciones de la disciplina tecnológica.
3. Lograr individualizar el efecto de las diferentes causas sobre cada uno de los factores dañados.
4. Lograr instalar una instrumentación de alta calidad y lograr un control de excelencia.

Bibliografía.

1. Alva-Argaez A.; Savulescu L. (2009). Process integration for sustainable development water reuse project selection – a retrofit path to water and energy savings. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 403.
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*. Acra Corporation, Miami, Florida, Estados Unidos.
3. Aguilar, Noé (2010). *Perfil competitivo de la agroindustria azucarera de caña de azúcar*. México: Editorial Veracruz.
4. Aguilar, Noé, *et. al* (2015). *Emergy and LCA evaluation of sugar industry in Veracruz, Mexico*. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Córdoba Veracruz México.
5. Azaret, Alberto; Cabrera, Osmel G.; Pérez, Eusebio E.; Hidalgo, Pedro E. (2005). Extracción en el tándem del central “Melanio Hernández”. *Revista de la Universidad Central “Marta Abreu”*. Las Villas, Cuba. No. 3, año 32. Editorial Feijó.
6. Badii, M. H; Guillen, A & J. L. (2018). *Abreu Statistical Assessment of Quality*. [on line]. [Consultado 9 marzo 2018]. Disponible en:<http://www.scielo.org.ar/scielo.php?>
7. Caballero. C, (2013). *Industrialización del jugo de caña*. Disponible en <http://industrializacionjugocaña.blogspot.es>.
8. Carrazana, Librado. (1987). *Análisis Agro Industrial Azucarero Teoría y práctica*, Editorial Pueblo y Educación.
9. Casanova, Eduardo y Alonso, José M. (2006). *Métodos de cálculos para el control azucarero*. Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras, Ministerio del Azúcar, Ciudad de La Habana.
10. Castellanos, Juan A.; González, Félix; Puerta, Juan F. (2005). *El consumo de agua en la industria azucarera como un problema energético y*

- medioambiental. Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 3, año 32. Editorial Feijó.
11. Chejne Janna, Farid. (2007). Uso eficiente de la energía: conceptos termodinámicos básicos. [on line]. Disponible en Internet en <http://www.metropol.gov.co>
 12. Cruz, A. (2007). Etapas producción de azúcar crudo. Disponible en http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311801/311801_ee.htm#ETAPAS.
 13. de Prada, César. (2014). Instrumentación para Control de Procesos. [on line]. Disponible en Internet en <http://www.isa.cie.uva.es>.
 14. Díaz, Lucas L. y Portocarrero, Eduardo T. (2002). Manual de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*L.). Honduras. Trabajo de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado Académico de Licenciatura. Zamorano, Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria.
 15. Diez, Oscar A.; Cárdenas, Gerónimo J.; Mentz, Luis F. (2010). Poder calorífico superior de bagazo, médula y sus mezclas, provenientes de la caña de azúcar de Tucumán, R. Argentina. *Revista industrial agrícola, Tucumán*. Vol.87, no.1, junio 2010. [on line]. [Consultado 21 enero 2016]. Disponible en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185130182011000100003 &lang=p](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185130182011000100003&lang=p).
 16. García, Yunier; López, Yoney; Benítez, Agustín. (2014). Optimización del sistema energético de un central azucarero para maximizar el excedente de bagazo. Matanzas, Cuba. *Revista Avanzada Científica*. Vol. 17, No. 1.
 17. Gómez, Higinia B. (2006). Procedimiento para la mejora de la calidad del proceso industrial cubano de la caña de azúcar. Cuba. Resumen de Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ciencias Empresariales, Departamento de Ingeniería Industrial.
 18. Gómez, Julio R.; de Armas, Teyra; Gil, Ariel. (2006). Competitividad y eficiencia en las oportunidades de ahorro de energía eléctrica en la industria

- azucarera. Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 1, año 33. Editorial Feijó.
19. González, F. (2010). Método para la determinación de la cantidad de agua de imbibición a utilizar en la industria de azúcar de caña.
 20. Gutiérrez Pulido, Humberto (1997). Calidad Total y Productividad. México: Editorial McGraw-Hill.
 21. Herrera, Ana C. (2011). Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichí S.A. Colombia. Tesis presentada como requisito para optar al título de Tecnóloga en Química en la modalidad de Práctica Empresarial. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías.
 22. Honing, Peter. (1987). Principios de la Tecnología Azucarera. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
 23. Hugot, E. (1986). Handbook of cane sugar engineering. Elsevier Science Publishers: New York.
 24. ICIDCA. (2012). Índice de Capacidades. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Ciudad de La Habana, Cuba.
 25. Jenkins, G.H. (1988). Introducción a la tecnología del azúcar de caña. Tercera edición. Editorial Edición Revolucionaria.
 26. Junco, Gerardo. (2011). Manual para la autogestión del aprendizaje por competencias. Centro Nacional de Capacitación Azucarera.
 27. Klemeš J; Smith R; Kim J. (2007). Handbook of water and energy management in food processing. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
 28. Manual de Operaciones. (2013). Grupo Azucarero AZCUBA.
 29. MACU (Manual de métodos analíticos para azúcar crudo). (2004). Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras. División de Aseguramiento de la Calidad.
 30. Marín, Laura V. (2012). Determinación de las condiciones apropiadas de preparación de un floculante como componente fundamental en el proceso

- de clarificación de jugo en Riopaila Castilla S.A, Planta Riopaila. Colombia. Trabajo de Grado. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías Tecnología Química.
31. Martínez-Patiño J.; Picon Nunez M.; Hernández Figueroa M. A.; Verda V.; Serra L. M. (2010). On the integration of power, heat and water in industrial processes, *Chemical Engineering Transactions*, 21, 253-258.
32. Matute, Lenis. (2012). Determinación de la concentración óptima de floculante a usar en la clarificación de jugos de caña en un central azucarero. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela*. [on line]. [Consultado 21 enero 2016]. Disponible en: www.revistaagronomiaucv.org.ve
33. Morales, Y. L; Kafarov, V; Ruiz, F; Castillo, E. F. (2010). Modelamiento de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de caña de azúcar. Etapas; preparación, molienda y clarificación. *Umbral Científico*, núm. 16, junio, 2010, pp. 47-59. Universidad Manuela Beltrán, Bogotá, Colombia.
34. Morales Zamora, M. y Gonzales Suarez, E. (2016). Evaluación de la fiabilidad en una industria diversificada a partir de la reconversión de sus instalaciones. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
35. Morejón, Y. *et. Al.* (2013). Influence of the sugar cane preparation to milling in the sugar production on the Sugar Agroindustrial Complex. Manuel Fajardo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Versión On-line ISSN 2071-0054. *Rev Cie Téc Agr vol.22 no.1 San José de las Lajas ene.-mar. 2013.*
36. Morrel Flores, Ignacio. (1989). *Tecnología Azucarera*. Ministerio de Educación Superior. Editorial Pueblo y Educación.
37. Murcia, Esteban T. y Martínez, Miguel A. (2005). Comparación de los ingenios azucareros mexicanos con propiedad pública y privada. *Revista de la Universidad Central “Marta Abreu”*. Las Villas, Cuba. No. 1, año 32. Editorial Feijó.

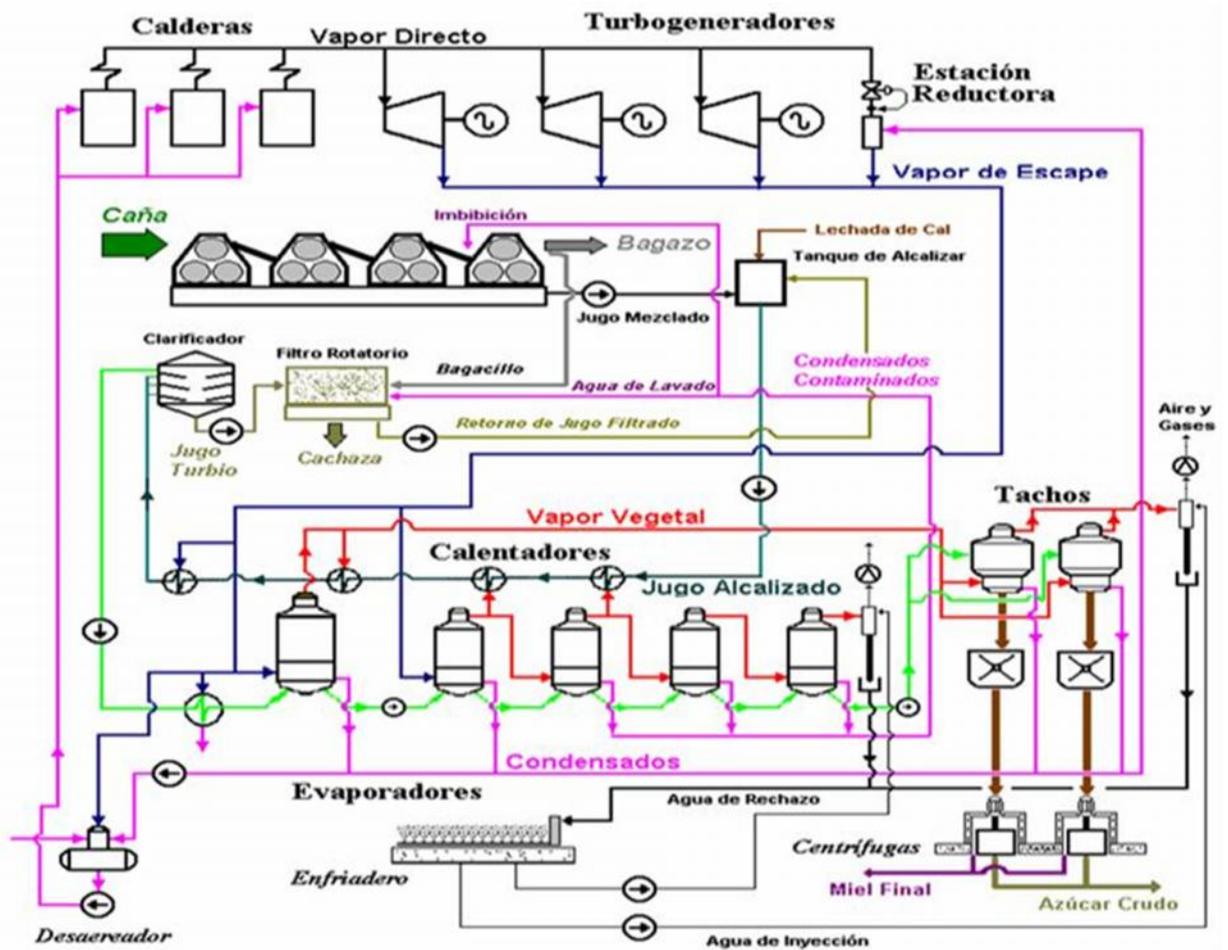
38. Ordóñez, Sandra C. (2004). Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero. Guatemala. Trabajo de graduación al conferírsele el título de Ingeniera Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.
39. Pedrosa Puertas, R. (1975). Fabricación de azúcar crudo de caña. Edición revolucionaria.
40. Pedrosa Puertas, R. (1983). Fabricación de Azúcar Crudo. Editorial Pueblo y Educación.
41. Pérez, Héctor. (2009). El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos. Editorial Universitaria, Ciudad de La Habana, Cuba.
42. Pérez, Pablo y Díaz, Santiago (1989). Estudio de insolubles en empresas azucareras de la provincia de matanzas. Centro Azúcar, Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 2/89.
43. Posada, E. D. (1987). Tecnología de la Producción Azucarera. ISPJAE. La Habana, Cuba.
44. Quintero, Heriberto y Peralta, Luis M. (2005). Modelación del proceso de extracción de jugos de caña en la Planta Piloto "José Martí". Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 3, año Editorial Feijó.
45. Ramírez, Juan de Dios y Caín, Isaac Conadesuca. (2018). La sustentabilidad de la agroindustria azucarera. 2° Congreso Internacional Zafranet 2018.
46. Rein, Peter. (2007). Can Sugar Engineering. Verlag Dr. Albert Bartens KG: Berlín.
47. Rein, Peter. (2012). Can Sugar Engineering. Verlag Dr. Albert Bartens KG: Berlín.
48. Rein P. (2012). Cane Sugar Engineering. Berlin: Editorial Bartens. Chapter 10: Clarification.
49. Rodríguez, Abel; Rosa, Darien; González, Luisa M.; Pérez, Waldo. (2007). Manejo distribuido de datos para facilitar el control de calidad de la

- producción de azúcar crudo de caña. Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 3, año 34. Editorial Feijó.
50. Rosero, E. y Ramírez, J. (2009). Modelado y Control de Molinos de Caña de Azúcar usando Accionamientos Eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. [on line]. Vol. 6, Núm. 3, Julio 2009, pp. [consultado 21 enero 2016]. Disponible en: <http://www.elsevier.es>.
51. Valdez, Antonio. (2014). Alternativa técnico-económicas a partir de la integración de producciones de azúcar y alcohol. Revista de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba (ATAC). No.2/2014. Editorial nacional de Cuba, La Habana 1963.
52. Van der Poel, P. W.; Schiweck, H.; Schwartz, T. (1998). Sugar Technology beet and cane manufacture. Published with support of the beet sugar development foundation, Denver, USA.
53. Vega González, Luis R. (2014). Factores que han impulsado la innovación en la instrumentación industrial, un estudio de caso. Revista INGENIERÍA Investigación y Tecnología. México, UNAM, Vol. V, No. 4, p. 281-298.
54. Vélez, Jorge A. y Jáuregui, Sergio L. (2006). Consideraciones teóricas sobre el análisis de consumo de potencia de un tándem de molinos azucareros con accionamiento eléctrico y transmisión mecánica. Revista de la Universidad Central "Marta Abreu". Las Villas, Cuba. No. 2, año 33. Editorial Feijó.
55. Woodall, William.H. (2016). The Use of Control Charts in Health-Care and Public-Health Surveillance. [on line]. Disponible en Internet en <http://www.npaihb.org>
56. Zepeda, Edwin R. (2012). Propuesta de alternativas para la reducción de pérdidas de sacarosa en un ingenio azucarero. El Salvador. Trabajo presentado para optar al título de: Ingeniero Químico. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Química.

Anexos.

Anexo 1:

Figura 1. Diagrama del proceso de producción del azúcar en un central cubano.



Anexo 2:

Tabla 1: Resultados de los parámetros en la etapa de extracción.

Parámetros analizados	día1	día2	día3	día4	día5	día6	día7	día8
Caña molida (ton/h)	131,19	133,41	143,27	127,30	132,18	121,93	135,31	149,03
Fibra en caña (%)	15,24	15,35	14,88	15,23	15,04	15,38	15,13	15,23
Pol en caña (%)	13,01	13,15	13,29	13,17	12,82	13,25	12,96	13,40
Fibra en bagazo (%)	46,41	46,44	46,39	46,21	46,40	48,34	46,24	46,30
Humedad en bagazo (%)	50,04	48,98	48,45	48,20	48,24	49,10	48,58	48,52
Pol en bagazo (%)	1,76	1,70	1,74	1,82	1,75	1,92	1,70	1,74
Agua de Imbibición(m ³ /h)	59,89	59,44	67,91	56,64	62,17	57,73	66,26	72,22
Temperatura agua de imbibición (°C)	79,00	79,03	79,06	78,98	79,00	79,05	79,00	79,03
Brix jugo mezclado (°Bx)	14,35	14,37	14,63	14,34	14,78	14,03	14,08	14,26
pH de jugo mezclado	5,26	5,02	5,24	4,88	5,02	4,71	5,23	5,10
Brix Jugo de la 1ra extracción (°Bx)	17,34	17,95	16,66	18,04	18,04	17,78	18,06	17,79
Pol Jugo de la 1ra extracción (%)	14,71	15,24	14,01	15,46	15,09	15,46	15,44	15,15
pH Jugo de la 1ra extracción	4,72	5,20	4,90	5,17	5,04	4,70	4,41	5,32
Pol de jugo mezclado (%)	11,29	11,04	11,27	10,69	10,94	10,67	11,10	10,89
% Materia extraña	11,63	10,00	11,48	11,62	12,05	12,47	12,11	12,73
Presión del último molino (kg/cm ²)	210,93	203,90	182,79	154,67	210,93	196,86	168,73	203,90

Continuación de la tabla 1:

día9	día10	día11	día12	día13	día14	día15	día16	día17	día18
147,78	148,63	131,22	141,96	128,38	140,66	144,89	142,95	147,58	122,41
15,21	15,46	15,18	15,23	15,24	15,23	15,09	15,43	15,20	15,36
13,70	13,30	12,97	14,17	13,36	13,55	12,82	13,96	13,16	13,33
46,41	46,41	46,50	46,37	46,31	45,95	46,36	46,41	46,35	46,14
48,76	48,08	48,35	48,75	45,80	49,05	48,49	48,56	48,28	48,61
1,91	1,88	1,69	1,77	1,73	1,72	1,73	1,69	1,74	1,79
78,07	73,22	64,34	85,46	60,88	72,69	59,56	77,17	69,41	58,90
79,02	79,04	79,01	79,00	78,99	78,89	78,99	79,00	79,07	79,08
14,94	14,65	14,52	14,69	14,54	14,86	14,02	14,34	14,05	14,07
4,84	4,86	4,86	5,20	5,17	4,72	5,21	5,23	4,72	4,31
17,74	17,51	18,33	17,69	17,14	17,48	16,87	16,31	16,92	17,51
14,83	15,75	15,05	14,54	14,87	14,39	13,72	14,36	14,91	14,94
5,33	4,80	5,30	5,04	4,98	4,91	4,94	5,19	5,30	4,75
10,93	10,67	11,17	10,67	10,95	11,,29	10,95	11,10	11,02	11,09
12,52	12,57	12,12	13,06	12,40	12,81	12,19	12,59	12,08	11,73
210,93	210,93	196,86	210,93	196,86	203,90	210,93	210,93	203,90	210,93

Continuación de la tabla 1:

día19	día20	día21	día22	día23	día24	día25	día26	día27
122,40	110,21	133,12	131,89	125,64	146,68	115,62	142,23	121,91
15,19	14,86	15,35	15,21	16,10	15,17	15,14	15,20	15,27
13,12	11,96	12,38	11,98	12,50	12,57	12,30	12,44	12,95
46,34	46,33	46,31	46,26	46,29	46,34	46,38	46,50	46,42
48,27	49,00	48,32	45,44	48,46	48,51	47,78	48,77	48,34
1,67	1,92	1,65	1,73	1,72	1,72	1,82	1,69	1,73
57,49	37,57	53,17	46,21	53,26	57,89	46,06	59,52	51,88
79,09	78,95	78,97	78,99	79,00	79,00	79,00	79,00	79,00
14,24	14,12	14,33	14,98	14,96	14,15	14,30	14,92	14,85
5,15	4,54	5,01	5,09	4,80	5,17	4,88	4,60	5,16
17,56	17,41	16,81	16,30	17,03	17,41	17,40	17,41	16,83
14,79	14,21	13,70	14,48	14,80	14,81	14,81	13,85	14,54
5,10	4,80	4,79	4,81	4,79	5,17	5,10	4,85	4,74
11,01	11,12	11,08	11,17	11,06	11,25	10,92	10,89	11,29
12,01	12,35	10,93	12,35	12,26	12,82	12,13	12,45	12,58
196,86	210,93	210,93	210,93	210,93	196,86	203,90	210,93	210,93

Tabla 2: Resultados de los parámetros en la etapa de purificación.

Parámetros analizados	día1	día2	día3	día4	día5	día6	día7	día8
Concentración de la lechada de cal (°Bx)	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20
Brix jugo alcalizado (°Bx)	12,02	12,50	12,20	12,05	12,09	12,03	12,01	12,09
pH de jugo alcalizado	6,98	6,96	6,94	6,94	6,97	6,96	6,93	6,90
Temperatura de salida de los calentadores (°C)	106,25	104,88	105,63	106,25	104,56	107,38	107,21	106,32
Brix jugo clarificado (°Bx)	13,08	13,30	13,07	13,30	13,28	13,33	13,13	13,34
Pol jugo clarificado (%)	11,26	10,98	11,12	11,28	11,32	11,18	11,34	11,44
pH de jugo clarificado	6,99	7,03	6,95	6,99	7,03	7,01	6,99	7,04
Brix jugo filtrado (°Bx)	11,59	11,40	11,52	11,57	11,80	11,50	11,89	11,62
Pol jugo filtrado (%)	9,02	9,02	9,17	8,92	8,92	8,96	9,20	8,86
Temperatura del agua de lavado (°C)	70	70	75	65	80	80	80	75
Pol en cachaza (%)	2,40	2,39	2,43	2,39	2,39	2,35	2,47	2,41
Humedad de la cachaza (%)	67,57	68,60	66,00	66,60	70,50	69,50	62,00	68,20
Cachaza% caña (%)	3,79	2,55	3,65	3,77	4,07	4,98	3,10	4,26
Presión de bajo vacío (pulgadas de mercurio)	10	10	10	10	10	10	10	9
Presión de alto vacío (pulgadas de mercurio)	16	16	16	17	18	16	16	16

Continuación de la tabla 2:

día9	día10	día11	día12	día13	día14	día15	día16	día17	día18
7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20
12,03	12,40	12,41	12,95	12,23	12,54	12,14	12,25	12,26	12,33
7,00	6,97	6,96	7,00	6,99	7,00	6,98	7,00	6,96	6,98
109,50	106,44	104,58	106,50	107,42	104,69	103,58	106,45	104,36	102,56
13,50	13,02	13,20	13,08	12,93	13,09	13,16	13,10	13,18	13,02
10,95	11,13	11,04	11,11	11,10	11,04	11,15	10,96	10,95	8,79
7,01	6,98	7,03	7,02	7,00	7,04	7,03	7,04	7,01	7,03
11,48	11,40	11,63	11,55	11,90	11,42	11,32	11,96	11,54	11,65
8,81	8,79	8,51	9,30	8,87	8,88	9,34	8,99	9,10	9,34
75	65	70	80	75	65	80	65	65	65
2,42	2,39	2,34	2,35	2,38	2,40	2,37	2,38	2,52	2,42
66,00	64,60	65,40	70,50	69,00	66,50	67,00	67,80	70,00	68,50
3,80	4,22	4,21	4,83	5,16	3,85	4,22	3,52	5,18	5,38
10	10	10	9	9	10	10	10	10	10
18	16	17	17	17	17	17	18	18	18

Continuación de la tabla 2:

día19	día20	día21	día22	día23	día24	día25	día26	día27
7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20
12,58	12,21	12,03	12,03	12,02	12,04	12,16	12,89	12,07
6,95	7,02	7,02	7,00	7,02	7,04	7,05	6,98	6,97
103,25	106,47	106,00	103,89	102,48	106,36	106,59	109,21	108,36
12,93	11,40	13,17	13,18	13,08	12,88	13,00	13,07	13,27
10,91	11,11	11,10	10,94	10,77	11,03	10,98	11,17	11,06
7,03	7,03	7,02	7,00	7,03	7,02	7,03	7,04	7,00
12,00	11,42	11,72	11,98	11,97	11,73	11,18	11,79	11,20
8,92	8,99	9,13	8,97	9,16	8,73	9,39	8,78	8,88
70	70	70	80	65	70	80	80	80
2,41	2,48	2,37	2,35	2,42	2,41	2,42	2,40	2,39
67,00	68,00	68,50	65,00	67,00	70,50	70,40	70,00	70,00
5,25	4,62	4,09	5,42	4,16	3,50	4,93	3,99	4,74
10	9	10	9	10	10	10	10	10
18	16	18	18	17	16	16	17	17

Tabla 3: Resultados de los insolubles en las corrientes del proceso.

	Insolubles en lodos (%)			Insolubles en jugo filtrado		
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
día1	8,39	8,15	8,17	2,77	2,19	2,23
día2	8,20	8,22	8,33	3,15	3,16	2,50
día3	8,14	8,18	9,10	3,25	3,02	2,78
día4	8,25	8,15	8,29	2,09	3,00	3,10
día5	8,20	8,33	8,32	3,01	3,12	3,24
día6	8,36	8,50	9,00	3,16	2,74	2,56
día7	9,20	9,14	8,41	2,48	3,14	3,06
día8	8,46	8,25	8,23	3,14	2,89	2,46
día9	8,16	8,18	8,14	2,10	2,17	2,50
día10	8,33	8,28	8,43	3,8	5	4
día11	9,24	9,5	9,02	3	4	3
día12	9,62	9,85	9,47	3,5	5	3,5
día13	9,78	8,98	9,24	3,5	4	4,3
día14	8,69	8,36	8,54	4	4,2	4,1
día15	8,81	8,76	8,69	5	4	3,5
día16	9,14	9,32	9,2	4	5	4
día17	9,13	9,16	9,21	5	4,2	4,5
día18	8,26	8,62	8,17	2,5	3,7	3,8
día19	12	12	13	3,1	3,12	3,45
día20	12	13	11,5	5	4,56	4,25
día21	10,5	10	11	3,2	3,41	3,36
día22	13	11	11	3,9	4,1	4,2
día23	11,5	12,5	12	3	5	5
día24	11	11,5	12	4,5	5	0,74
día25	11	11,3	11,5	4,2	4,4	4,6
día26	11	11,5	12	3,4	3,8	3,5
día27	12,5	11	11,5	2,9	2,85	2,9

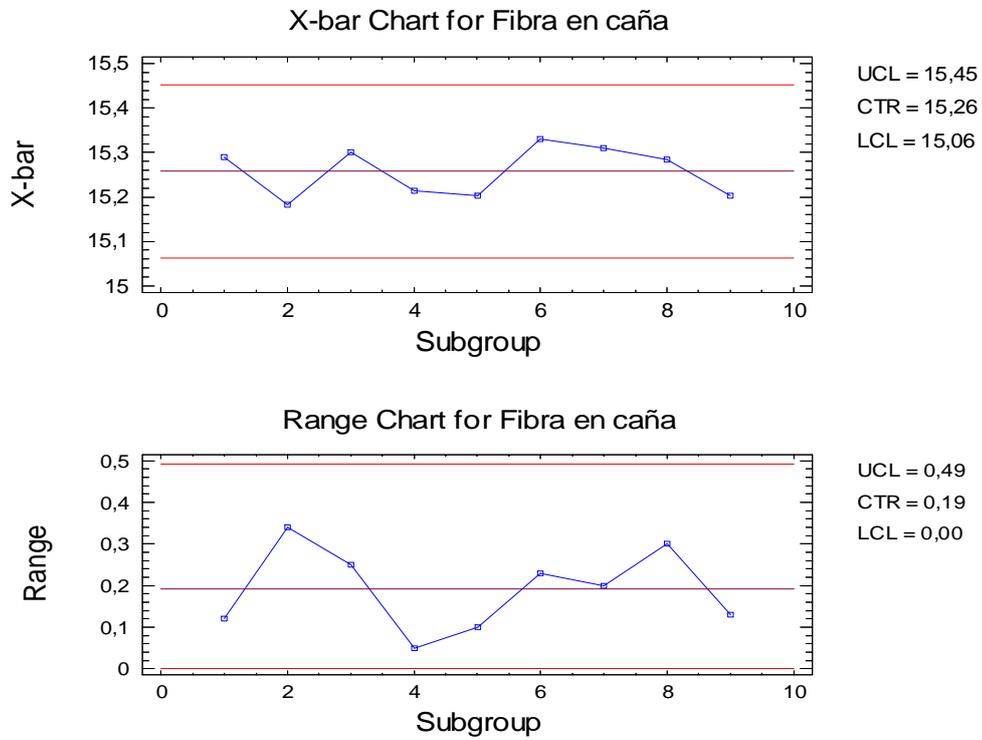
Continuación de la tabla 3:

Insoluble en jugo clarificado			Insolubles en jugo mezclado			Insoluble en jugo alcalizado		
MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
1	1,4	1	0,38	0,30	0,29	3	3,2	3
0,9	0,85	1	0,38	0,39	0,38	2,9	3,1	3
0,9	1,4	1,2	0,44	0,41	0,44	3	2,8	2,8
1,2	1,5	0,95	0,41	0,30	0,37	3	2,9	3,2
0,7	0,75	0,85	0,13	0,12	0,10	2,8	2,9	3,2
0,9	1	1,2	0,45	0,38	0,34	3	3	2,9
1,1	1,5	1	0,39	0,34	0,43	3	2,8	2,7
0,89	0,75	1,2	0,44	0,44	0,34	3	3,1	2,5
0,95	0,8	0,9	0,46	0,43	0,46	2,7	2,8	2,8
1	0,9	1,2	0,45	0,42	0,45	2,5	2,6	3
0,84	1,40	0,77	0,41	0,38	0,47	2,8	3,2	3,1
0,66	0,75	0,98	0,48	0,45	0,43	2,7	2,8	2,9
0,88	1,50	1,40	0,43	0,52	0,51	2,6	3,1	3
0,43	0,98	0,78	0,50	0,45	0,46	3,2	3	2,8
1,20	1,20	0,87	0,39	0,42	0,44	3,2	3,1	2,7
1,30	1,30	1,20	0,50	0,43	0,46	3,3	3,4	3,1
1,20	1,20	0,74	0,45	0,48	0,44	2,6	2,7	2,9
0,86	1,40	0,55	0,42	0,41	0,43	2,5	2,7	2,8
1,30	0,90	0,85	0,36	0,38	0,4	3,3	3,1	3
0,80	0,82	0,88	0,45	0,46	0,39	2,9	3	3,1
0,78	0,99	0,98	0,43	0,42	0,46	2,8	2,8	3,2
0,99	1,1	1,2	0,38	0,39	0,45	3,2	2,9	2,9
1,20	1,30	1,50	0,4	0,39	0,4	3,1	2,4	2,8
0,99	1,2	1,40	0,41	0,35	0,33	3	2,5	2,7
1,00	0,97	0,95	0,35	0,34	0,35	2,9	2,6	2,6
1		0,89	0,37	0,38	0,38	2,8	2,7	2,5
1,2	1,3	0,99	0,36	0,39	0,37	2,7	2,8	2,6

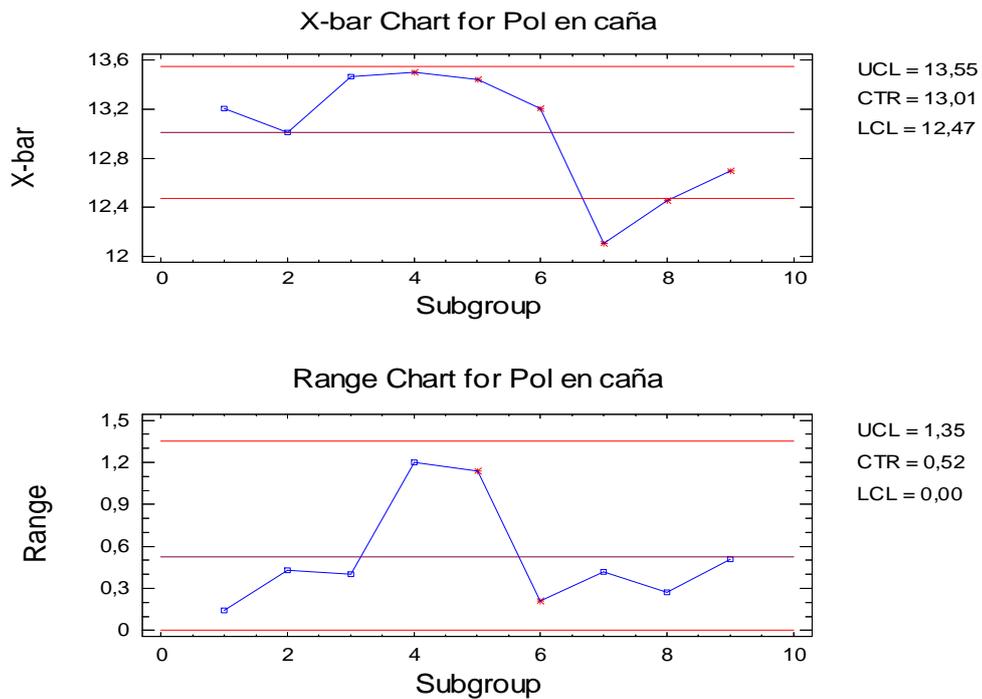
Anexo 3:

Resultados de las cartas de control en la etapa de extracción y purificación.

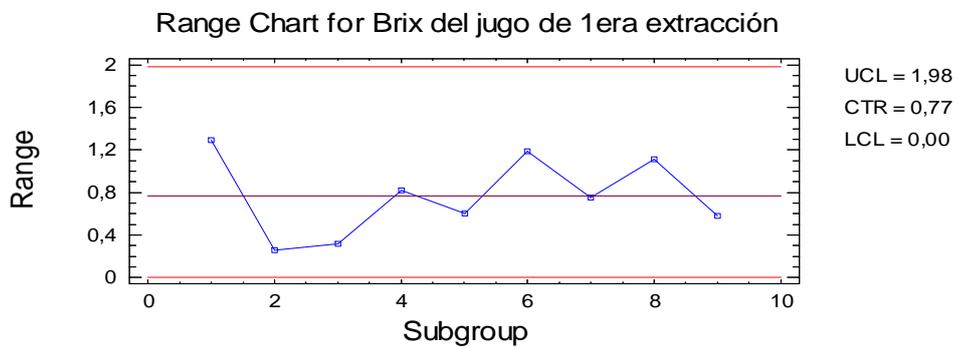
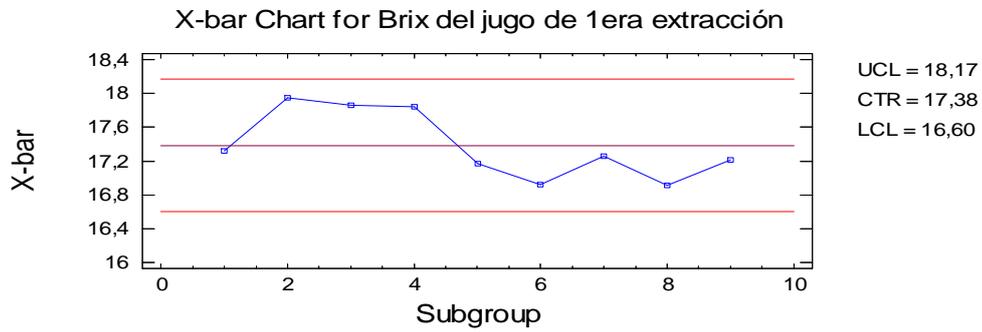
) Cartas de control de media y rango para la fibra en caña.



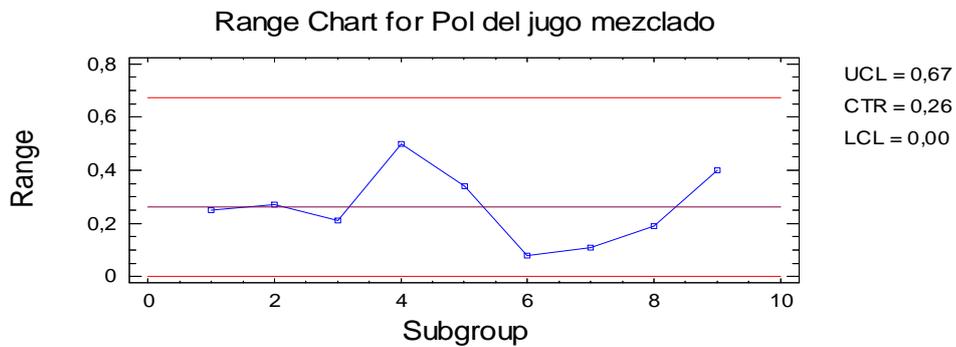
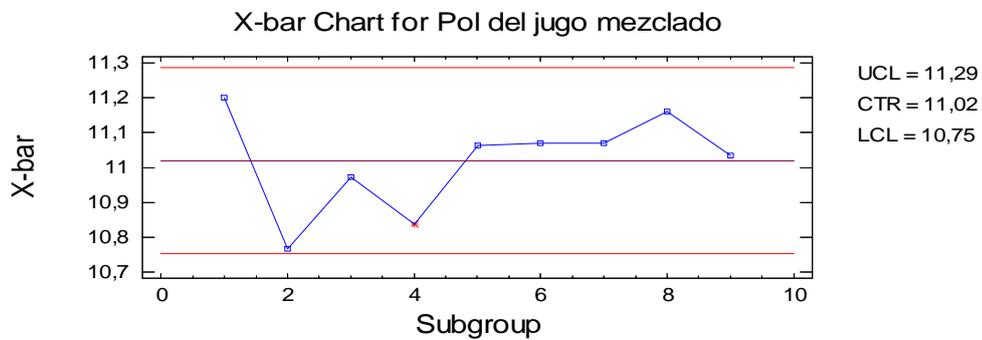
) Cartas de control de media y rango para la Pol en caña.



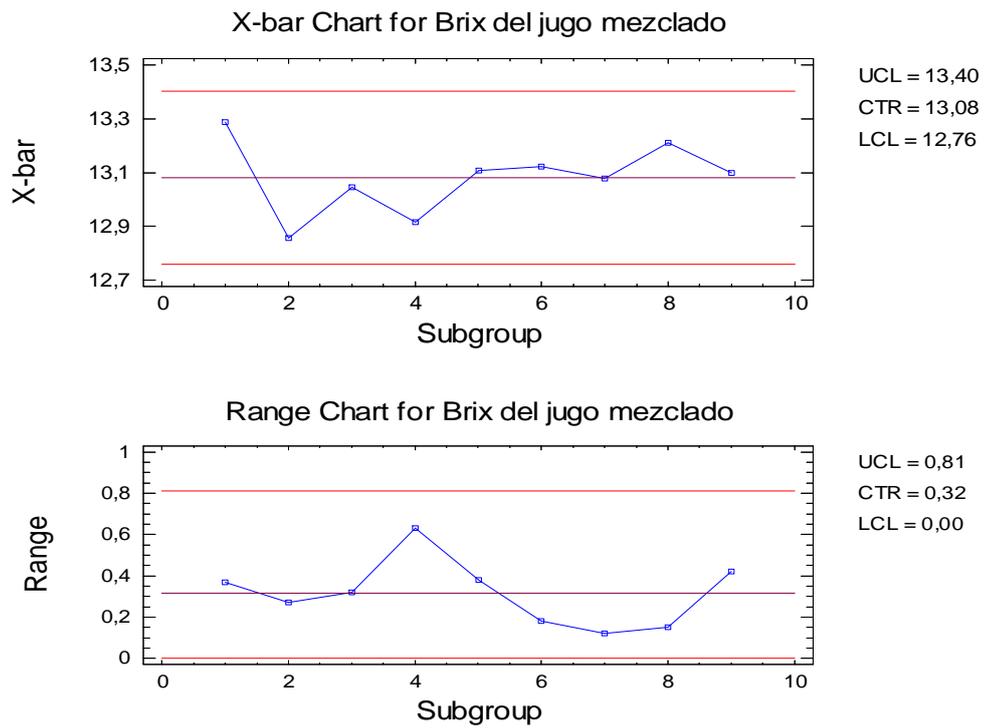
) Cartas de control de media y rango del Brix del jugo de la primera extracción.



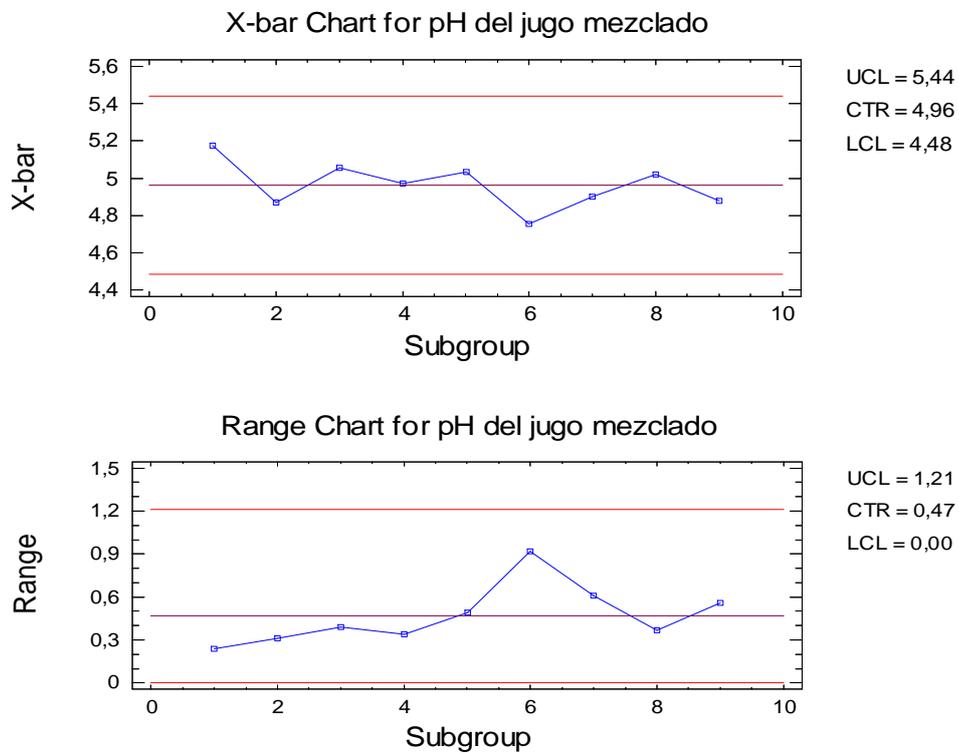
) Cartas de control de media y rango para el Pol del jugo mezclado.



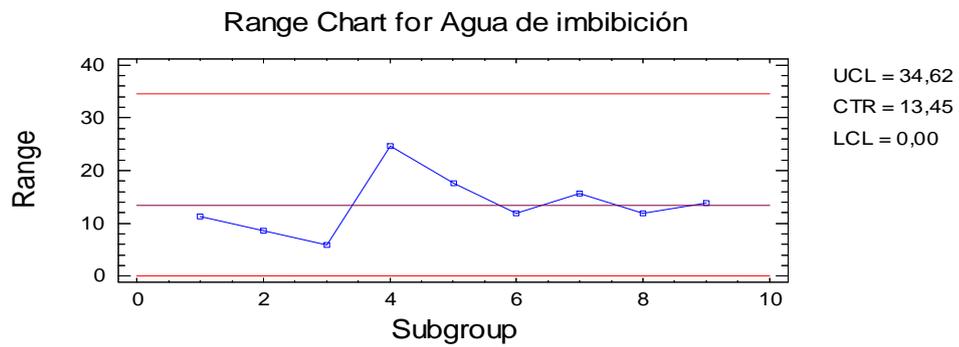
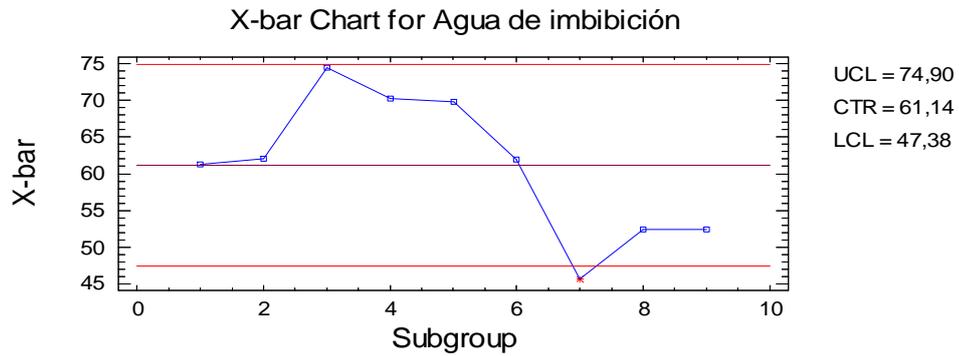
) Cartas de control de media y rango para el Brix del jugo mezclado.



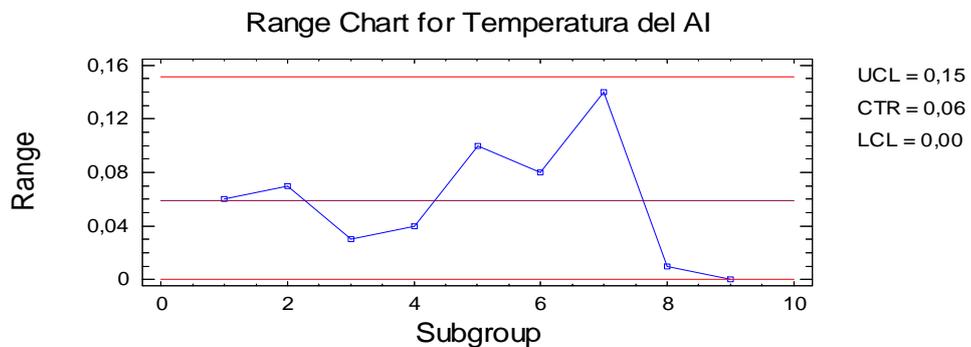
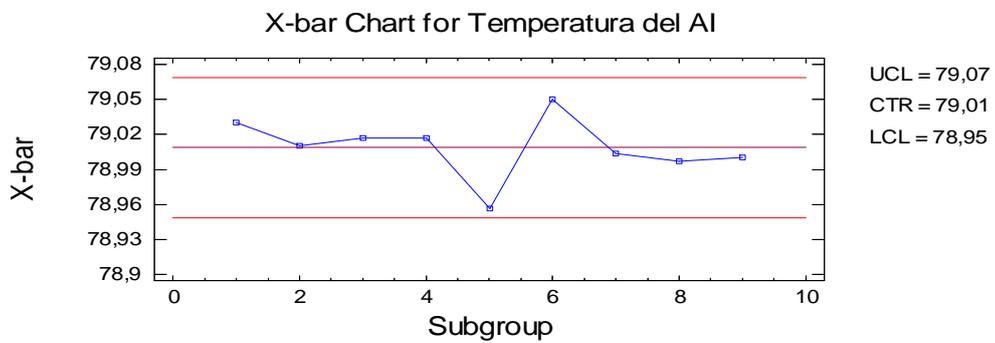
) Cartas de control de media y rango para el pH del jugo mezclado.



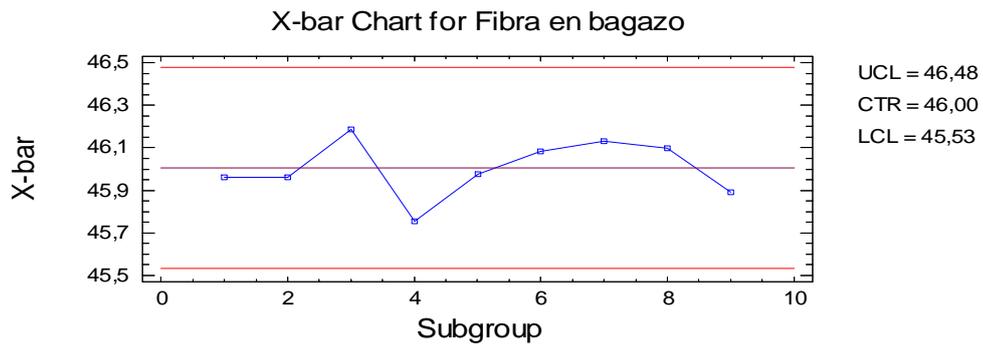
) Cartas de control de media y rango para el agua de imbibición.



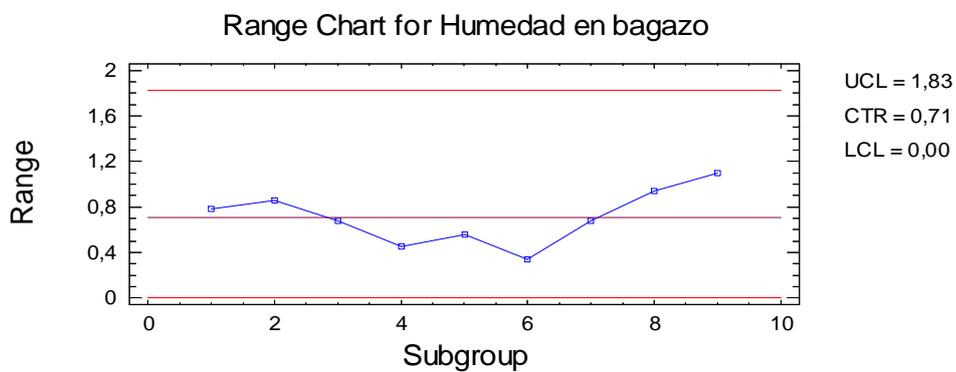
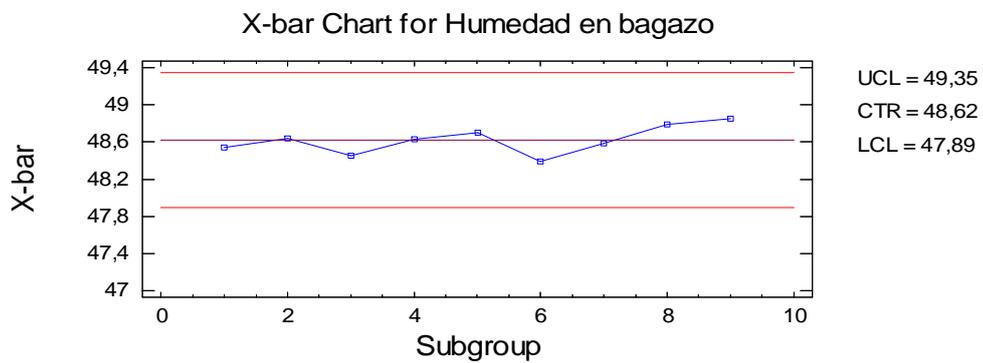
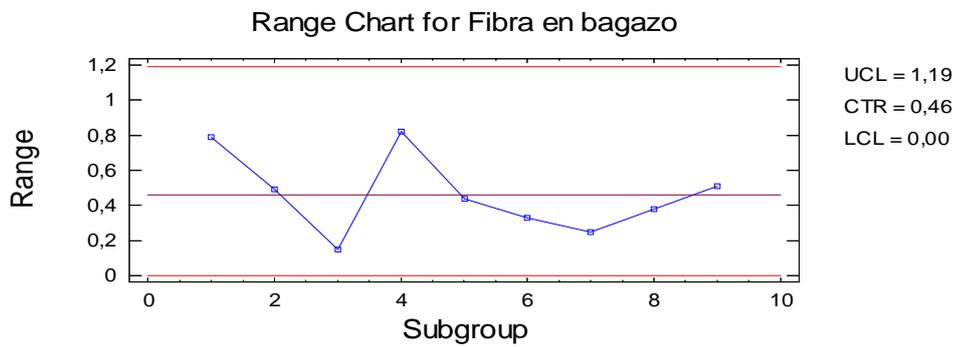
) Cartas de control de media y rango para la temperatura del agua de imbibición.



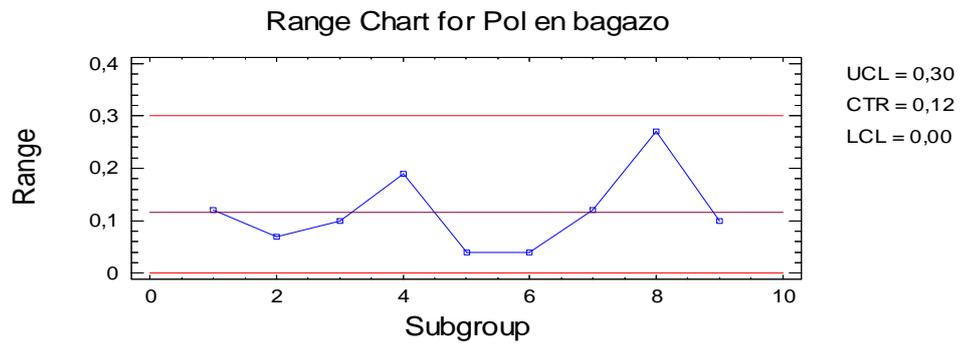
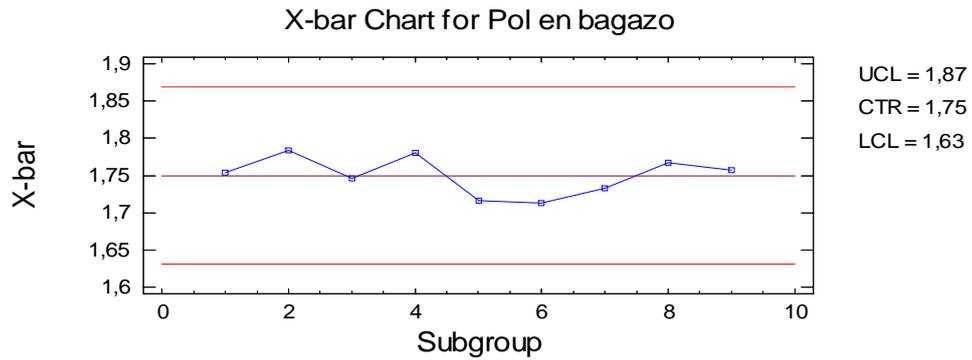
) Cartas de control de media y rango para la Fibra en bagazo.



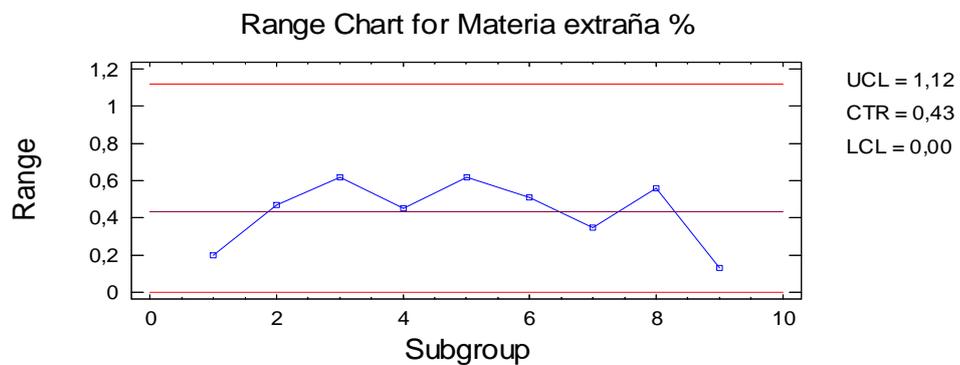
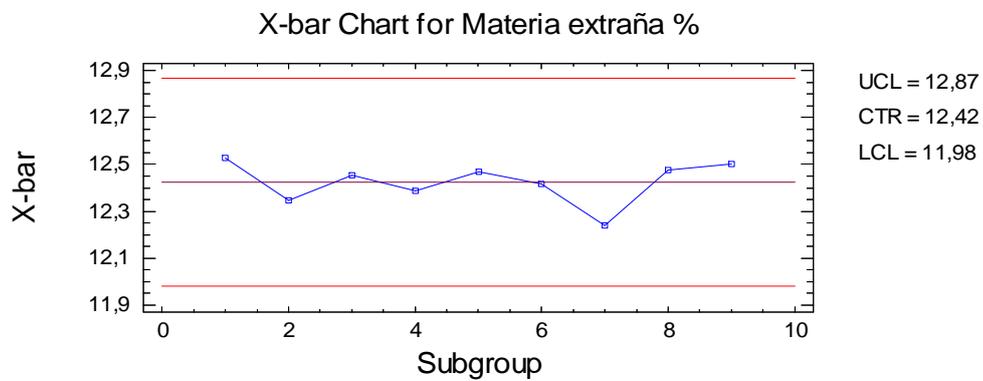
) Cartas de control de media y rango para la humedad del bagazo.



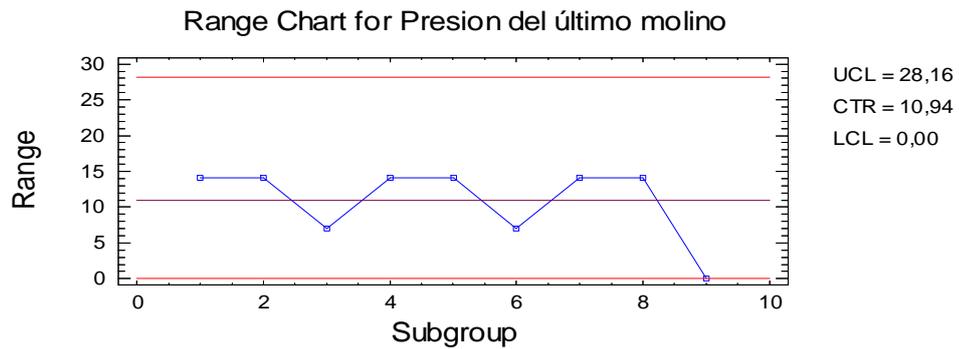
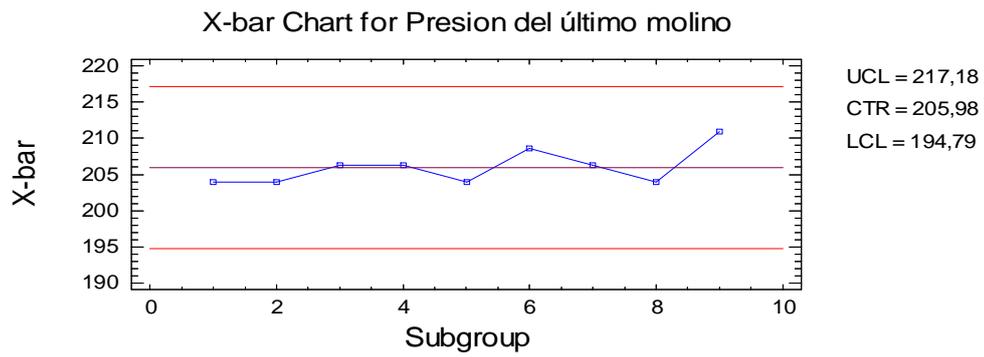
) Cartas de control de media y rango para la Pol en bagazo.



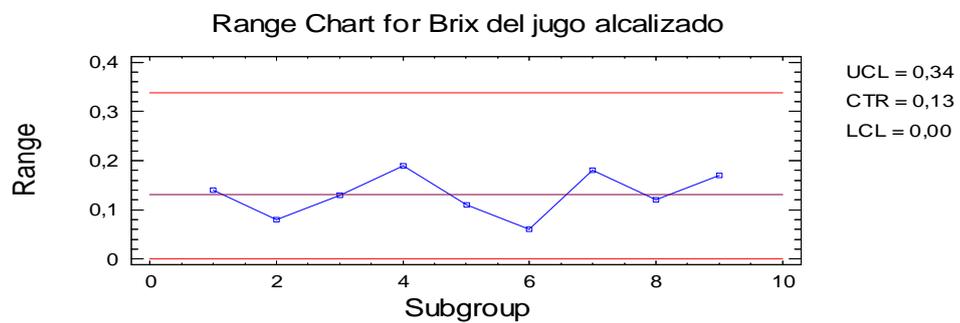
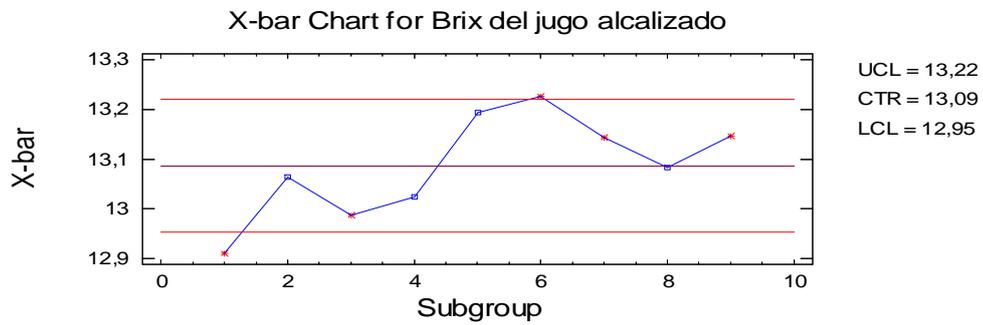
) Cartas de control de media y rango del contenido de materia extraña.



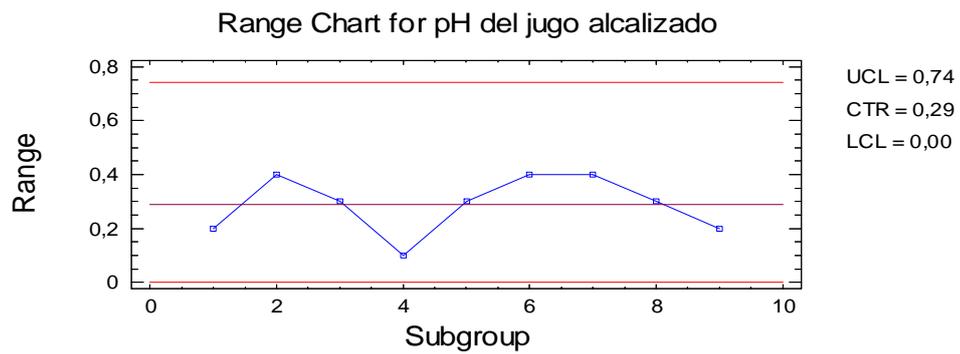
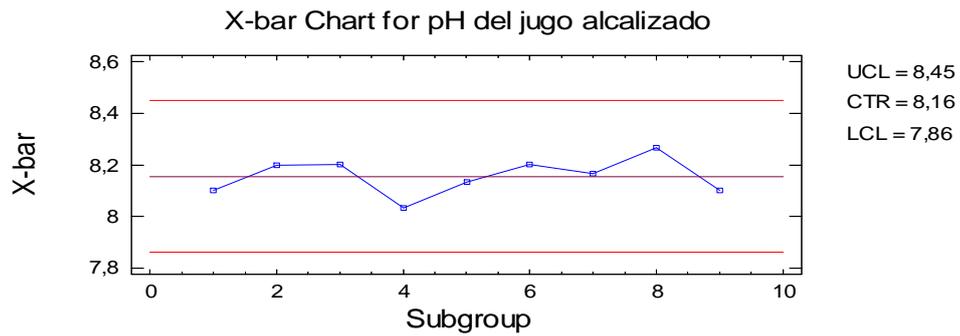
) Cartas de control de media y rango para la presión del último molino.



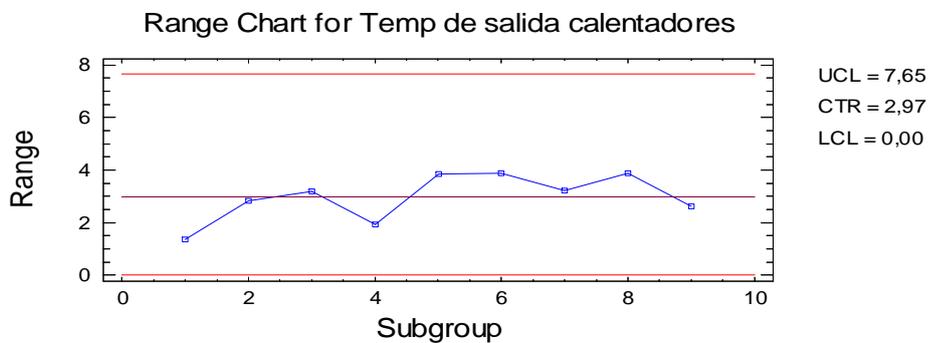
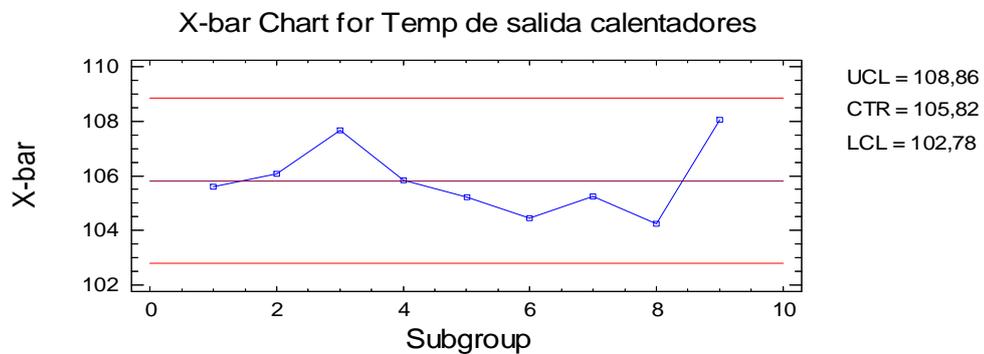
) Cartas de control de media y rango para el Brix del jugo alcalizado.



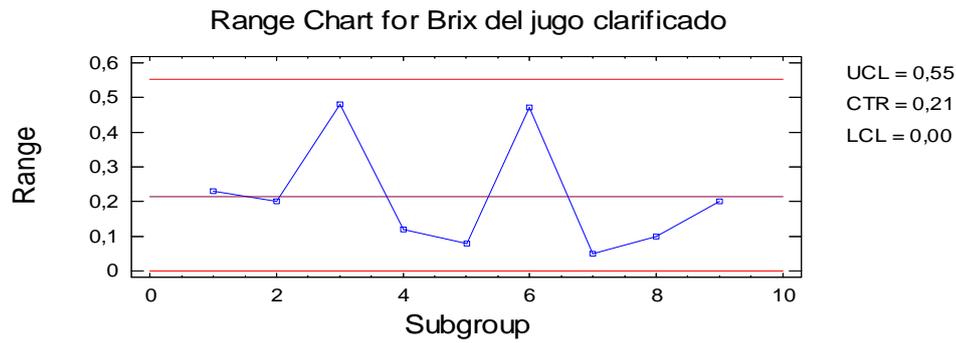
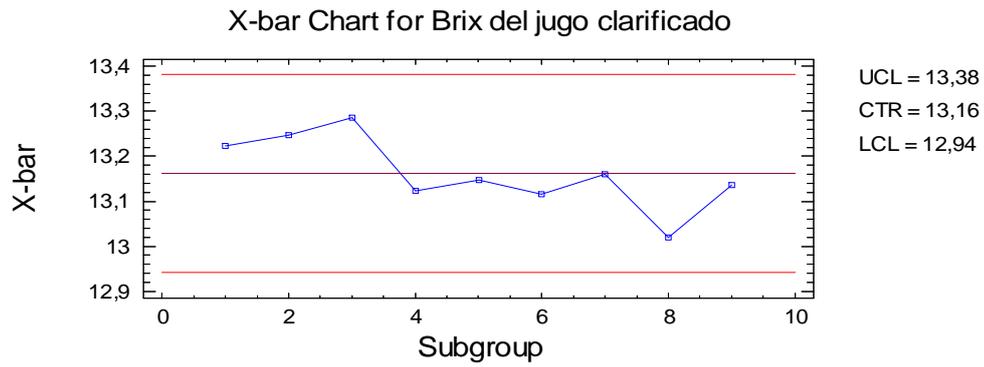
) Cartas de control de media y rango para el pH del jugo alcalizado.



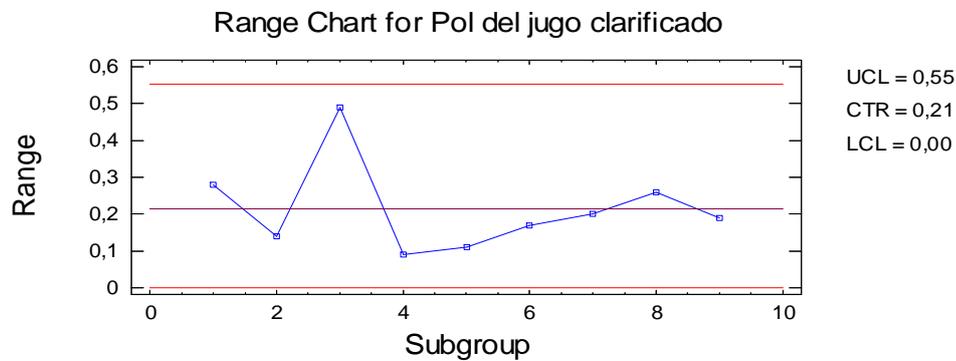
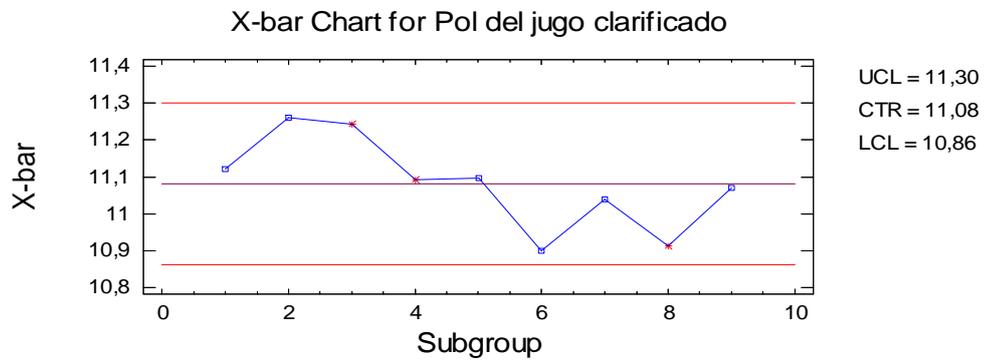
) Cartas de control de media y rango para la temperatura de salida de los calentadores.



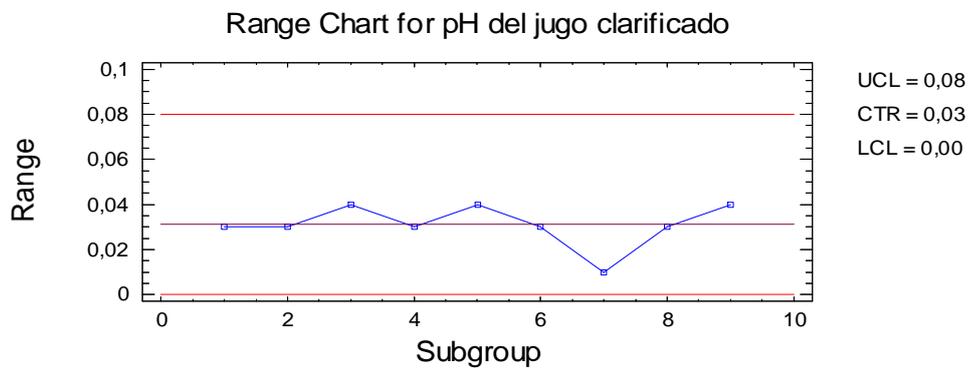
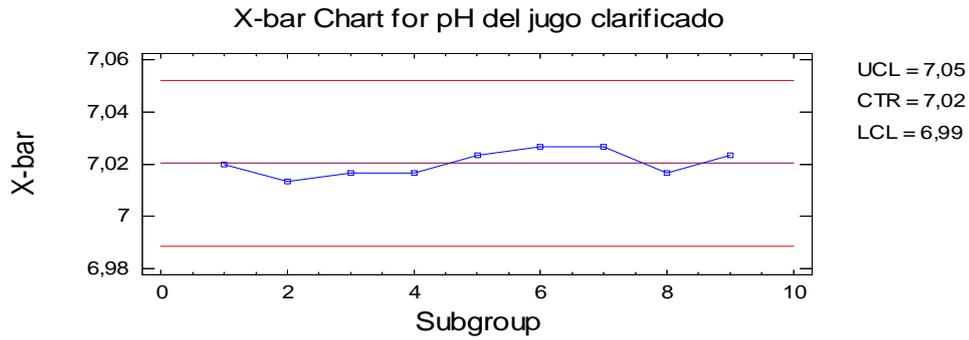
) Cartas de control de media y rango para el Brix del jugo clarificado.



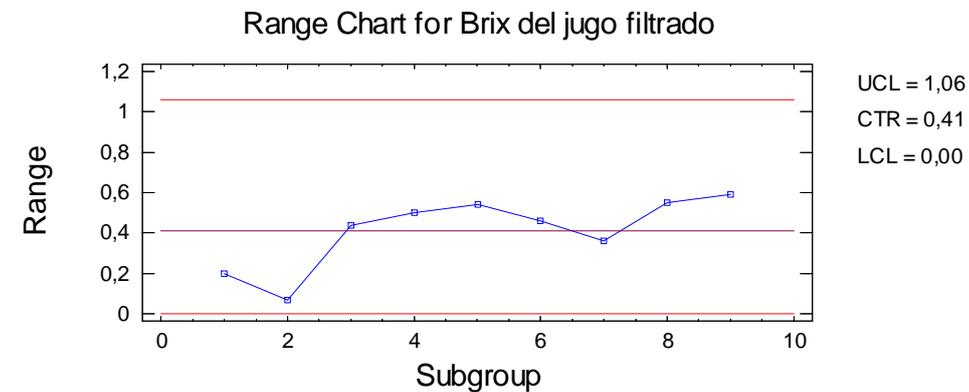
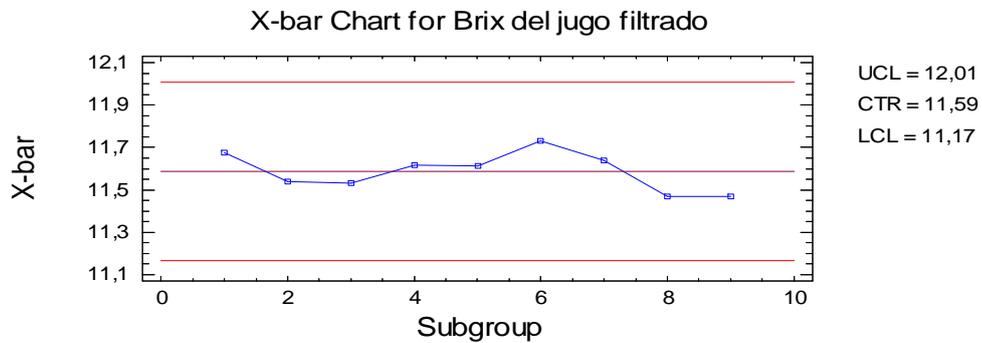
) Cartas de control de media y rango para la Pol del jugo clarificado



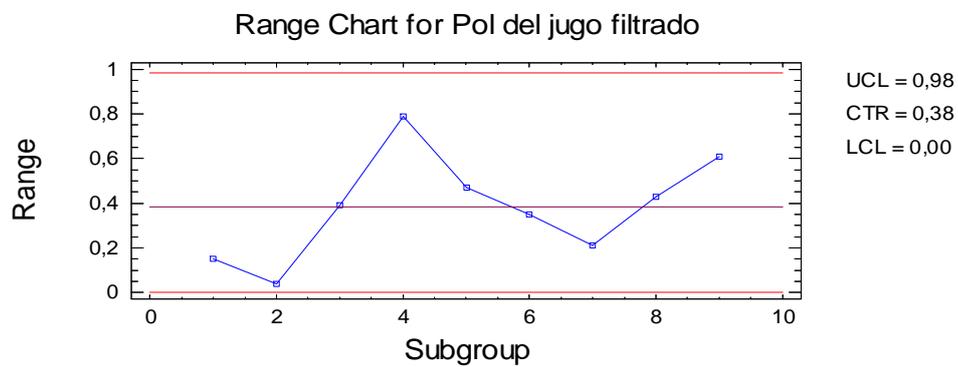
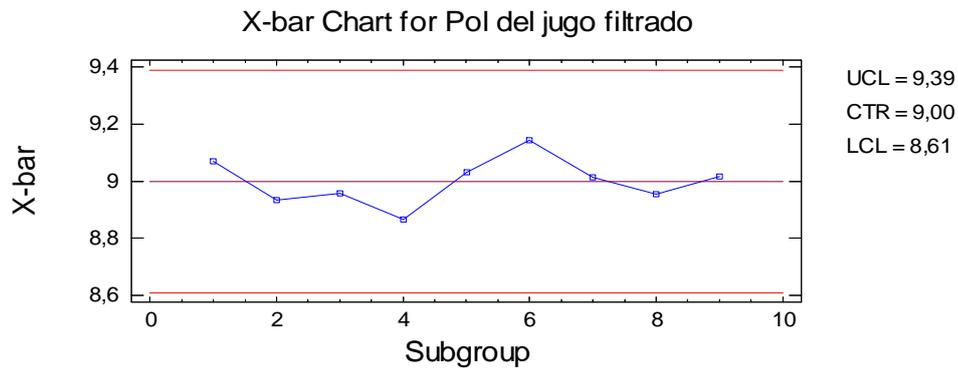
) Cartas de control de media y rango para el pH del jugo clarificado.



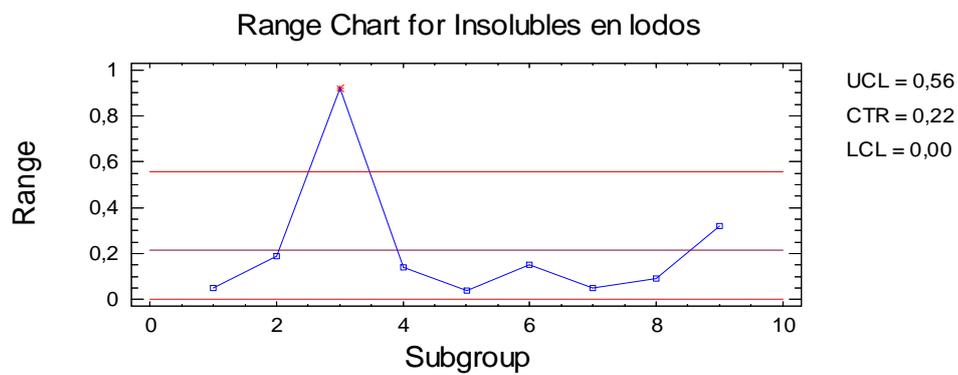
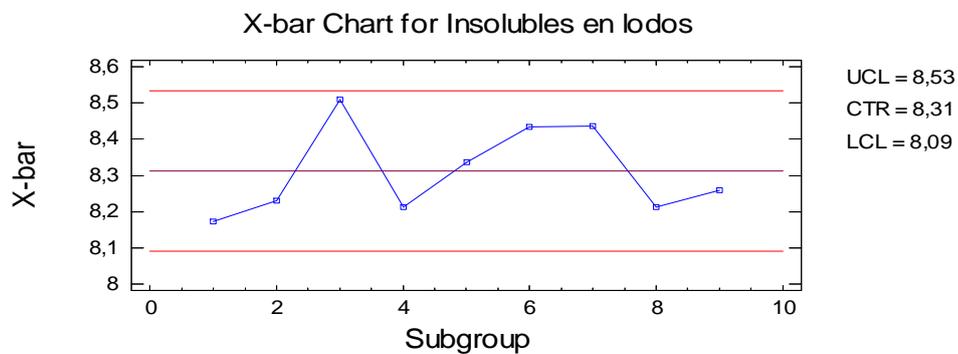
) Cartas de control de media y rango para el Brix del jugo filtrado.



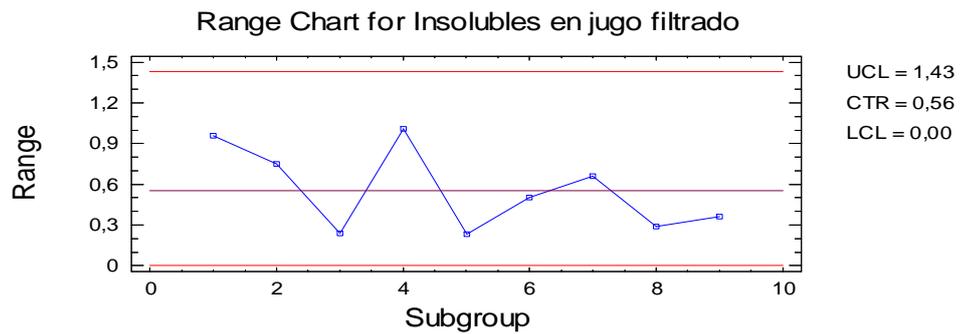
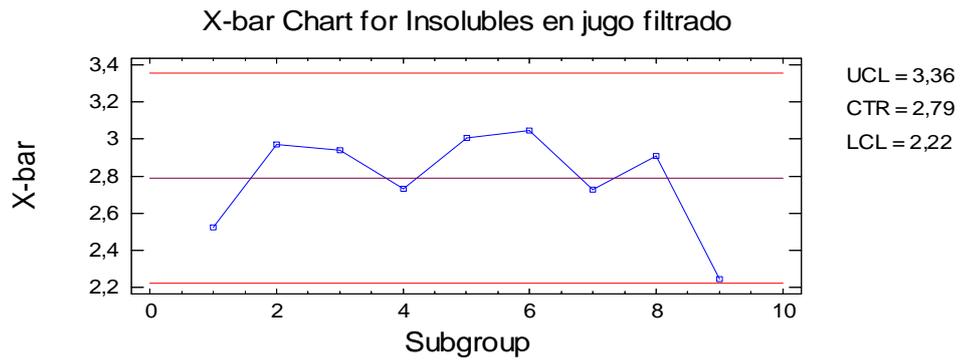
) Cartas de control de media y rango para la Pol del jugo filtrado.



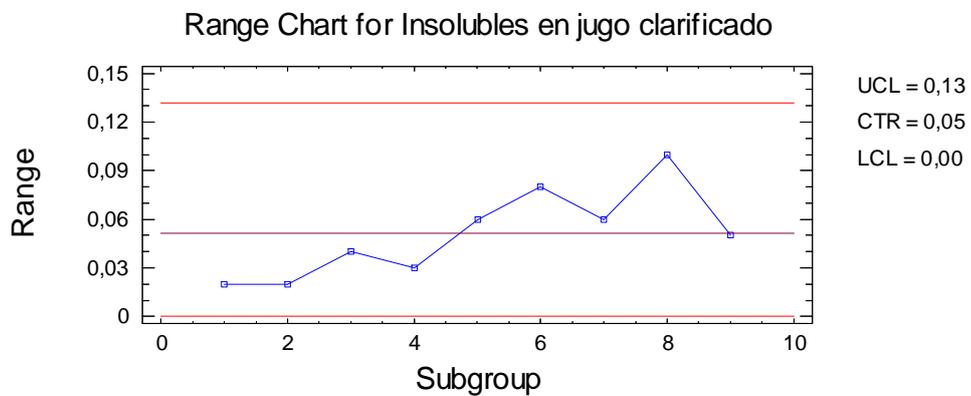
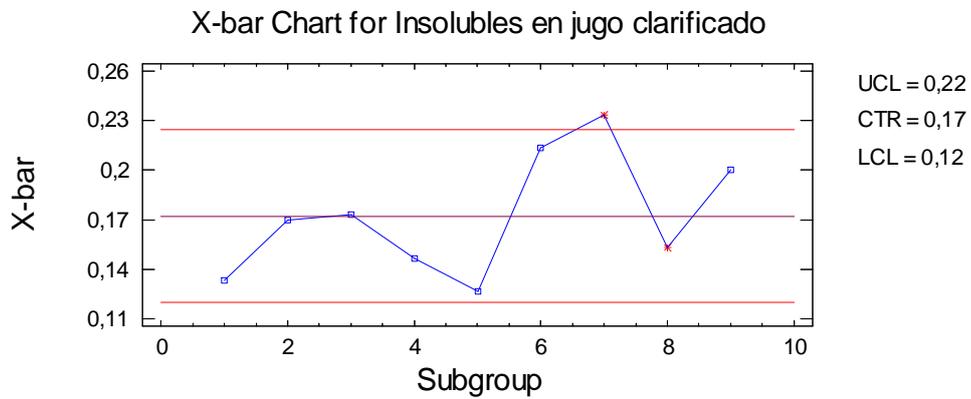
) Cartas de control de media y rango para los insolubles en lodos.



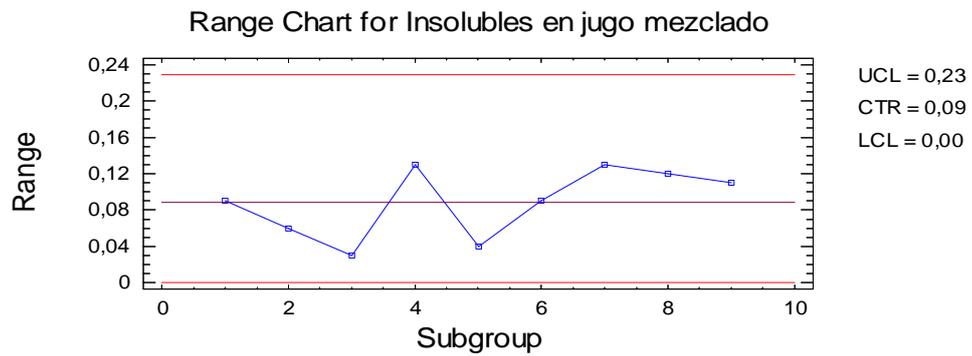
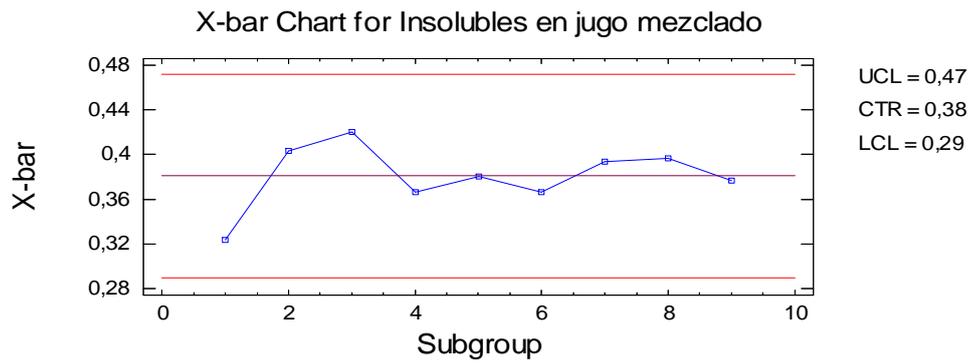
) Cartas de control de media y rango para los insolubles en jugo filtrado.



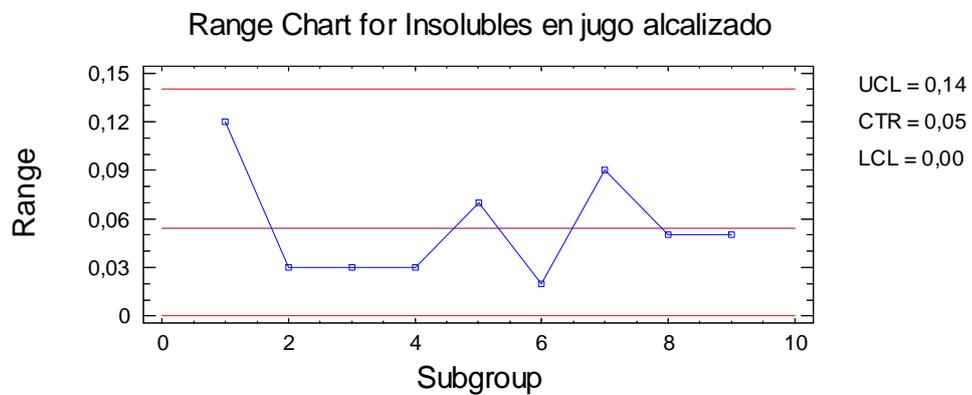
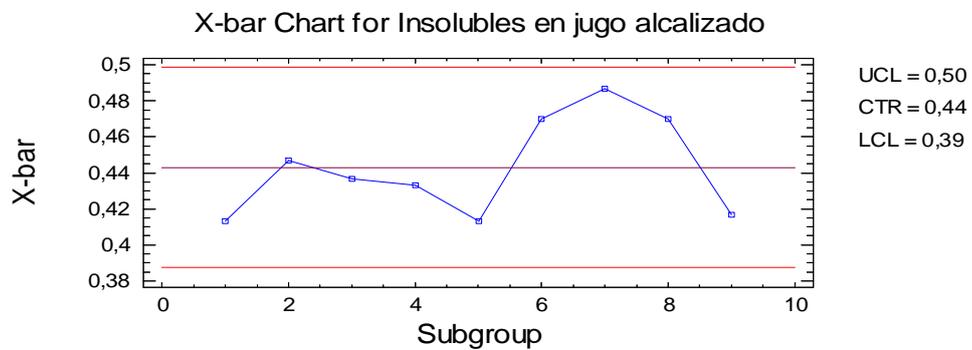
) Cartas de control de media y rango para los insolubles en jugo clarificado.



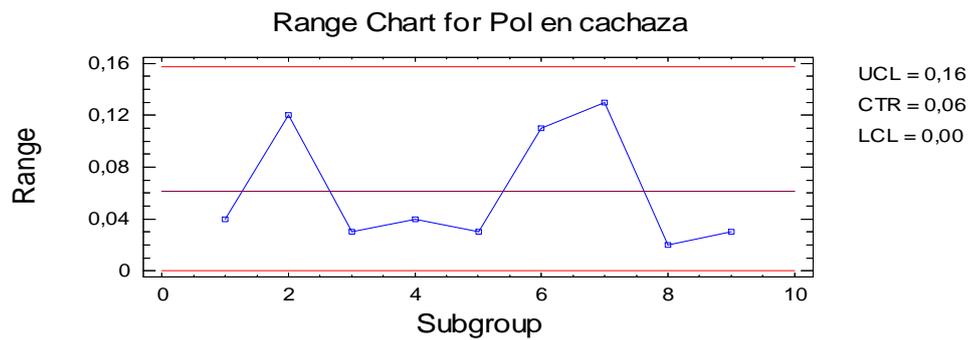
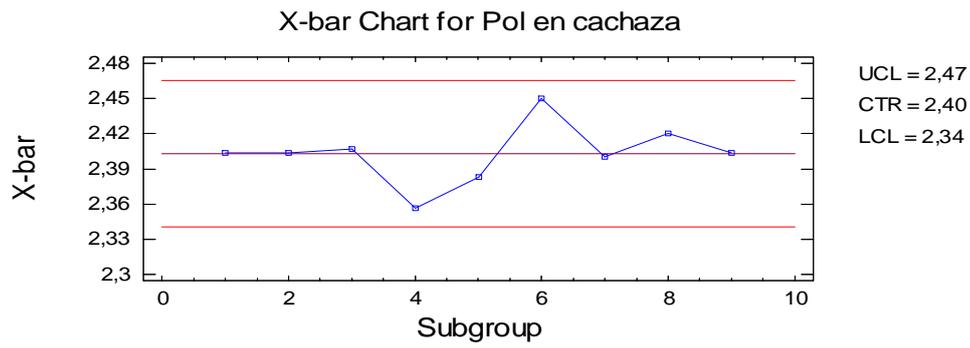
) Cartas de control de media y rango para los insolubles en jugo mezclado.



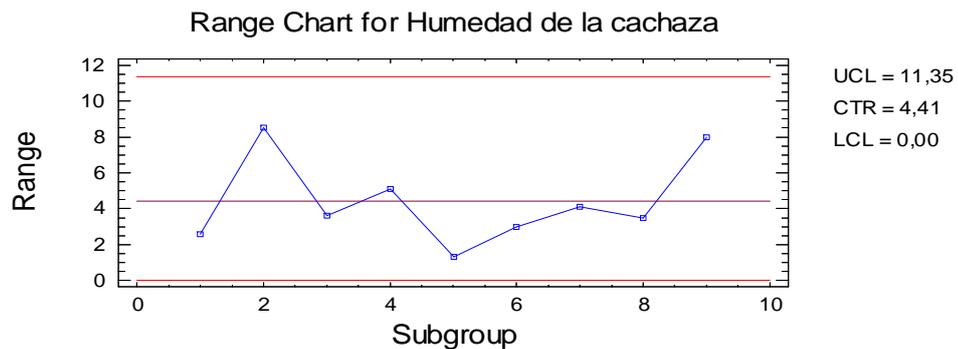
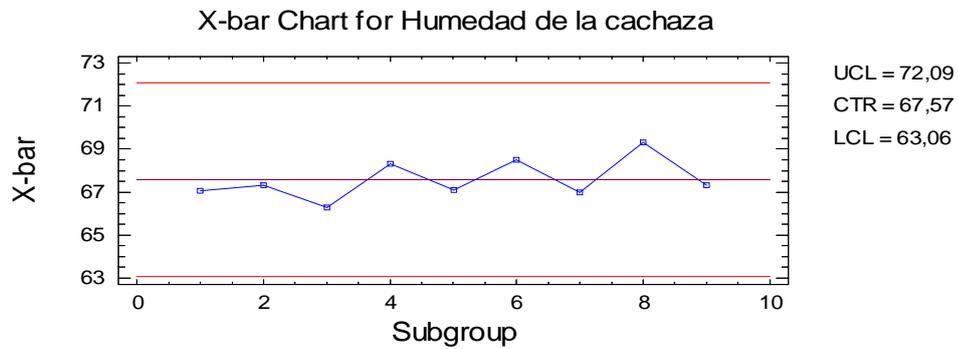
) Cartas de control de media y rango para los insolubles en jugo alcalizado.



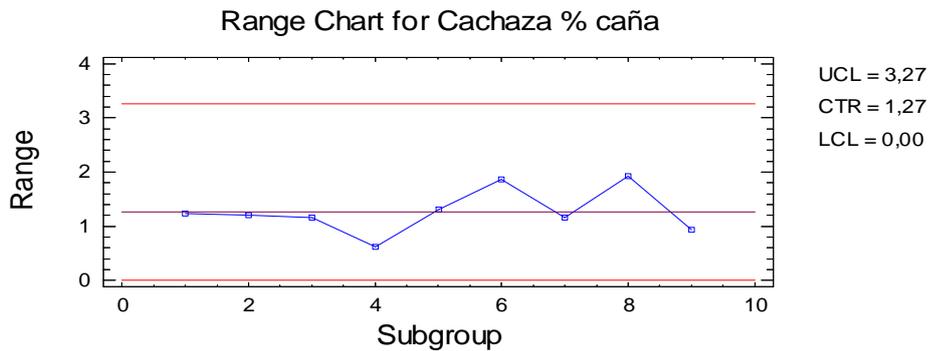
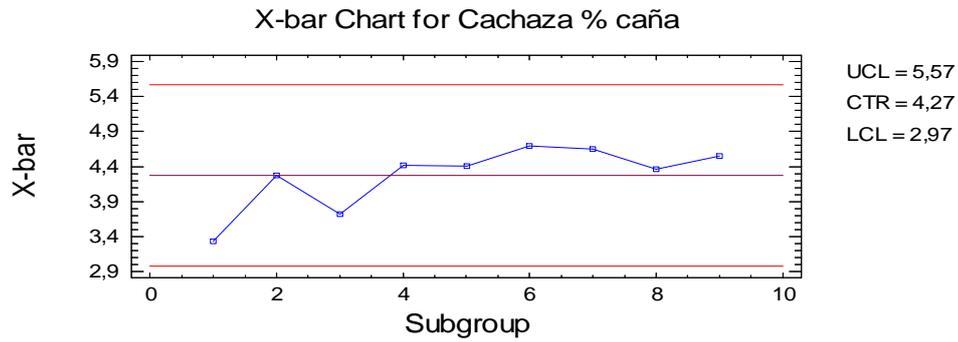
) Cartas de control de media y rango para la Pol en cachaza.



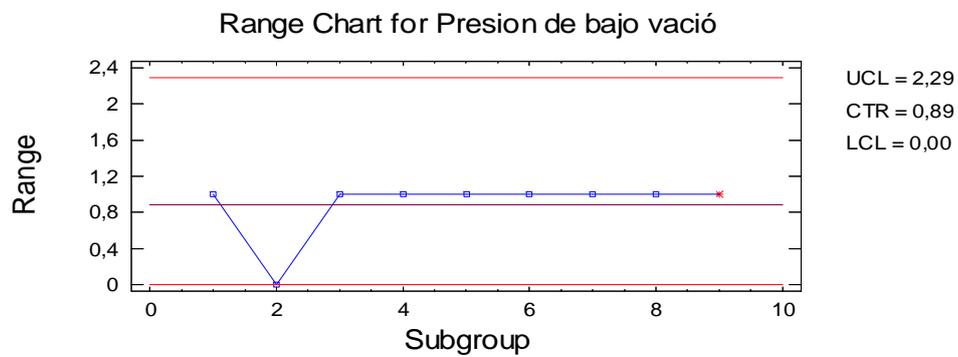
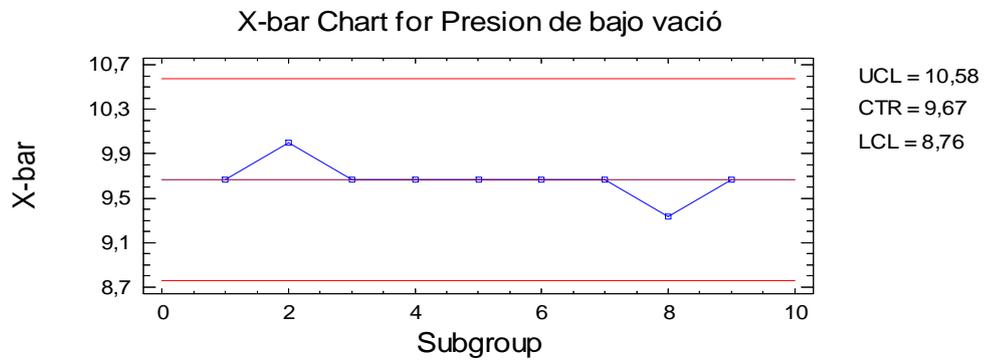
) Cartas de control de media y rango para la Humedad en cachaza.



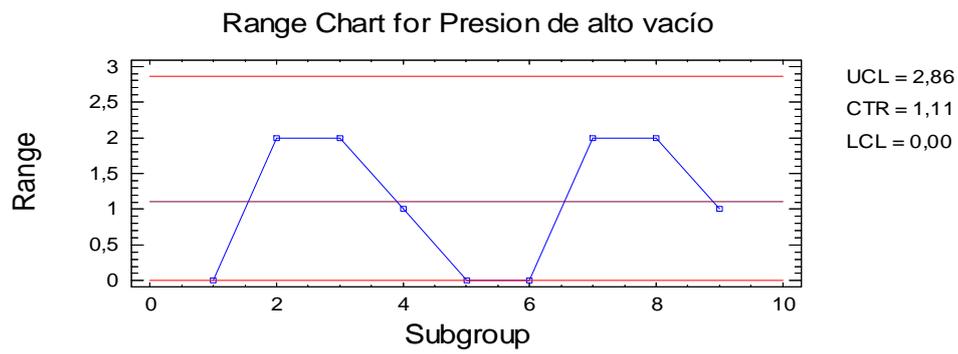
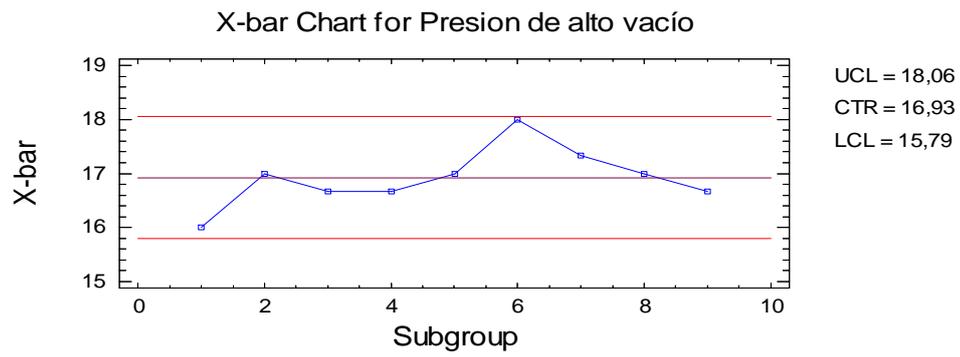
) Cartas de control de media y rango para la Cachaza% caña.



) Cartas de control de media y rango para de la presión de bajo vacío.



) Cartas de control de media y rango para de la presión de alto vacío.



Anexo 4:

Tabla 1: Resultados de los balances de masa en el área de extracción y los indicadores de eficiencia del área.

	Residuo leñoso (t/h)	Jugo mezclado(t/h)	Agua de Imbibición(m ³ /h)	% Extracción de Pol en molinos (%)	% Pérdidas en los molinos (%)	% Extracción de jugo mezclado (%)
día1	43,09	147,99	59,89	95,55	4,45	112,81
día2	44,10	148,75	59,44	95,73	4,27	111,50
día3	45,96	165,23	67,91	95,80	4,20	115,32
día4	41,96	141,99	56,64	95,45	4,55	111,54
día5	42,84	151,50	62,17	95,58	4,42	114,62
día6	38,79	140,87	57,73	95,39	4,61	115,53
día7	44,27	157,30	66,26	95,71	4,29	116,25
día8	49,02	172,23	72,22	95,73	4,27	115,56
día9	48,43	177,42	78,07	95,43	4,57	120,06
día10	49,51	172,34	73,22	95,29	4,71	115,95
día11	42,84	152,72	64,34	95,75	4,25	116,39
día12	46,63	180,79	85,46	95,90	4,10	127,35
día13	42,25	147,01	60,88	95,74	4,26	114,51
día14	46,61	166,74	72,69	95,79	4,21	118,54
día15	47,16	157,29	59,56	95,60	4,40	108,56
día16	47,53	172,59	77,17	95,98	4,02	120,73
día17	48,39	168,60	69,41	95,66	4,34	114,24
día18	40,75	140,56	58,90	95,53	4,47	114,83
día19	40,12	139,77	57,49	95,83	4,17	114,19
día20	35,35	112,43	37,57	94,85	5,15	102,02
día21	44,12	142,17	53,17	95,58	4,42	106,80
día22	43,36	134,74	46,21	95,25	4,75	102,16
día23	43,70	135,20	53,26	95,21	4,79	107,61
día24	48,02	156,55	57,89	95,52	4,48	106,73
día25	37,74	123,94	46,06	95,17	4,83	107,20
día26	46,49	155,26	59,52	95,56	4,44	109,16
día27	40,10	133,69	51,88	95,61	4,39	109,66

Tabla 2: Resultados de los balances de masa en el área de purificación y las pérdidas del área.

	Jugo Filtrado (ton/h)	Jugo Alcalizado (t/h)	Jugo Clarificado (t/h)	Lechada de Cal (t/h)	Lodos (t/h)
día1	17,03	235,04	226,76	70,01	8,27
día2	23,85	220,13	211,89	47,53	8,24
día3	18,37	261,40	254,25	77,80	7,14
día4	15,43	222,93	214,08	65,51	8,85
día5	15,20	249,15	241,40	82,44	7,75
día6	18,23	215,42	207,77	56,33	7,66
día7	11,40	236,10	227,52	67,41	8,58
día8	12,81	260,23	251,48	75,20	8,75
día9	20,95	302,87	294,03	104,51	8,84
día10	17,38	260,95	253,52	71,23	7,44
día11	13,34	225,92	219,42	59,85	6,50
día12	15,96	247,57	238,13	50,82	9,44
día13	15,52	229,02	219,09	66,49	9,93
día14	16,01	251,83	241,71	69,08	10,12
día15	12,75	227,79	218,65	57,74	9,14
día16	13,03	256,30	247,86	70,68	8,44
día17	20,87	246,14	238,08	56,67	8,06
día18	23,43	208,56	201,67	44,57	6,89
día19	20,91	201,55	194,19	40,87	7,37
día20	12,28	165,64	161,01	40,93	4,63
día21	14,55	223,48	217,46	66,77	6,02
día22	8,72	225,66	222,08	82,20	3,58
día23	16,18	233,69	225,62	82,30	8,07
día24	22,30	245,67	235,69	66,82	9,98
día25	23,76	196,48	189,32	48,78	7,17
día26	20,73	227,36	221,64	51,37	5,72
día27	18,43	225,14	217,22	73,02	7,92

Continuación de la tabla 2:

	Agua de Lavado (t/h)	Cachaza (t/h)	Bagacillo (t/h)	Pérdidas (%)
día1	11,52	4,41	1,65	0,62
día2	18,17	4,16	1,60	0,57
día3	13,25	3,41	1,38	0,44
día4	8,85	3,54	1,26	0,50
día5	11,18	5,81	2,09	0,82
día6	12,71	3,05	0,91	0,44
día7	5,11	4,03	1,73	0,57
día8	9,03	8,02	3,05	0,97
día9	16,87	8,88	4,11	1,06
día10	13,50	6,67	3,12	0,81
día11	8,79	3,54	1,60	0,49
día12	9,97	4,99	1,54	0,58
día13	9,20	5,29	1,68	0,73
día14	8,62	4,19	1,46	0,53
día15	6,74	4,85	1,71	0,62
día16	8,25	5,82	2,16	0,69
día17	15,87	5,17	2,11	0,67
día18	19,81	6,04	2,77	0,90
día19	18,17	8,63	4,00	1,30
día20	12,10	8,47	4,02	1,59
día21	12,02	6,32	2,83	0,91
día22	8,68	7,66	4,12	1,14
día23	11,10	5,11	2,13	0,79
día24	16,63	6,69	2,38	0,87
día25	20,31	6,04	2,33	1,03
día26	19,31	7,49	3,18	1,02
día27	15,55	8,19	3,15	1,24

Tabla 3: Resultados de los Indicadores de eficiencia a partir de la separación de insolubles en el área de purificación.

	Eficiencia de purificación (%).	Eficiencia de Clarificación.	Retención en el filtro.	Por ciento de recirculación de insolubles.
día1	39,52	67,11	52,30	47,70
día2	33,52	69,37	41,46	58,54
día3	36,33	65,67	49,76	50,24
día4	44,45	70,77	41,05	58,95
día5	26,46	59,44	57,26	42,74
día6	34,02	64,36	26,71	73,29
día7	47,40	65,74	67,19	32,81
día8	46,58	65,49	77,77	22,23
día9	28,44	59,01	72,68	27,32
día10	35,42	57,35	78,60	21,40
día11	28,16	61,66	54,07	45,93
día12	43,04	67,26	50,66	49,34
día13	54,94	74,09	58,46	41,54
día14	54,22	74,41	50,81	49,19
día15	61,39	77,68	63,83	36,17
día16	42,56	64,02	68,25	31,75
día17	15,94	53,50	47,66	52,34
día18	4,35	58,29	53,75	46,25
día19	32,52	67,24	74,25	25,75
día20	10,50	56,80	79,69	20,31
día21	10,46	49,23	67,50	32,50
día22	4,77	34,39	85,86	14,14
día23	38,52	67,82	60,45	39,55
día24	51,29	76,02	60,13	39,87
día25	17,75	59,53	57,19	42,81
día26	3,43	47,86	69,99	30,01
día27	31,98	62,25	72,02	27,98

Anexo 5:

Tabla 1: Resultados de los indicadores de eficiencia de proceso.

	Rendimiento (valor diario)	Recobrado (valor diario)	% Perdidas en Residuo Leñoso.	% Perdidas en Cachaza.	Perdidas en miel final.	Perdidas indeterminadas.
día1	9,56	72,93	4,45	0,62	10,20	11,80
día2	11,56	87,17	4,27	0,57	10,32	2,33
día3	10,74	80,15	4,20	0,44	11,09	4,13
día4	11,78	88,76	4,55	0,50	10,65	4,47
día5	9,77	75,65	4,42	0,82	9,82	9,28
día6	11,71	87,75	4,61	0,44	10,03	2,84
día7	9,96	76,26	4,29	0,57	9,93	8,95
día8	9,80	72,54	4,27	0,97	10,39	11,83
día9	8,92	64,64	4,57	1,06	10,47	19,26
día10	11,03	82,23	4,71	0,81	10,66	1,59
día11	8,84	86,28	4,25	0,49	10,54	1,56
día12	8,41	88,90	4,10	0,58	11,58	5,17
día13	10,08	74,88	4,26	0,73	10,22	9,90
día14	10,46	76,59	4,21	0,53	12,54	6,14
día15	8,92	69,06	4,40	0,62	9,61	16,32
día16	10,54	74,90	4,02	0,69	9,88	10,51
día17	9,76	73,61	4,34	0,67	9,38	12,01
día18	10,51	78,25	4,47	0,90	9,69	6,69
día19	9,14	69,12	4,17	1,30	9,21	16,20
día20	10,93	90,71	5,15	1,59	9,51	6,96
día21	9,75	78,17	4,42	0,91	10,25	6,26
día22	10,57	87,59	4,75	1,14	10,76	4,23
día23	9,51	75,45	4,79	0,79	9,66	9,32
día24	8,83	69,66	4,48	0,87	9,51	15,47
día25	12,72	82,59	4,83	1,03	11,16	0,39
día26	8,80	70,14	4,44	1,02	11,14	13,26
día27	12,36	94,65	4,39	1,24	11,05	11,34