

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



Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico

**“Evaluación del comportamiento de las principales variables operacionales
de la etapa de extracción del Central Azucarero México”**

Autor:

Daniela Morera Pérez de Corcho.

Tutor:

MSc. Jonathan Serrano Febles

DrC. Mario YLL Lavín

Matanzas, 2021

Pensamiento:

“La ciencia no conoce país, porque el conocimiento pertenece a la humanidad y es la antorcha que ilumina el mundo”.

Louis Pasteur

Declaración de Autoridad:

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

Daniela Morera Pérez de Corcho

Agradecimientos:

- ✓ A Dios que es el centro de mi vida.
- ✓ A mis amados padres, Barbarita y Joseito, por toda su comprensión y cariño sin límites. Por su apoyo constante y por creer en mí siempre. Por darme fuerzas y por sus sacrificios que han hecho este sueño posible. Nunca podré compensar tanto amor y dedicación, viviré agradecida.
- ✓ A mi hermana por su apoyo, sus consejos y por darme la felicidad de ser tía. Fanny ha sido una luz y una alegría en estos años de sacrificios.
- ✓ A mi cuñado Robe por escucharme y ser uno más de la familia.
- ✓ A mi abuela por sus oraciones y a mi abuelo Lalo a quien recuerdo todos los días.
- ✓ A todos mis tíos por su cariño y preocupación.
- ✓ A mi tutor Jonathan una persona maravillosa a quien admiro por su calidad profesional y humana, de quien estaré eternamente agradecida por todo su esfuerzo, dedicación y compromiso. Por cada enseñanza y sus palabras de ánimo, mil gracias. Un privilegio haberlo conocido.
- ✓ A Mayito por sus valiosos conocimientos acompañados de su vasta experiencia. Por su tiempo y atención desmedida con la investigación.
- ✓ Al profesor Orozco por toda su ayuda y dedicación.
- ✓ A todos los profesores, que gracias a sus enseñanzas a lo largo de toda la carrera han contribuido a mi formación como profesional.
- ✓ A Alejandro y a los demás trabajadores de la UEB Empresa Azucarera "México", que me brindaron su solidaridad y apoyo para el desarrollo del proyecto investigativo. En especial el personal del laboratorio y del área de extracción por su compromiso.
- ✓ A Marynés y mis compañeros de aula por su amistad y solidaridad, a los que tomaron otro camino y aun aquellos que están en Rusia pero fueron incondicionales el tiempo que compartimos juntos.
- ✓ A mis amigas del cuarto Elianay y Melisa, tan cercanas como la familia, por animarme y estar siempre en los momentos más difíciles. Gracias por todo lo que aportaron a mi vida y por esos lindos recuerdos que jamás olvidaré.

Simbología:

AI: Flujo de agua de imbibición [m^3/h]

Brix: Porcentaje en peso de sólidos disueltos en una solución [$^{\circ}Bx$]

BxJM: Contenido de sólidos disueltos del jugo mezclado [$^{\circ}Bx$]

BxRL: Contenido de sólidos disueltos del residuo leñoso [$^{\circ}Bx$]

CM: Flujo de caña molida [kg/h]

CPk: índice de capacidad real del proceso

eJM: Porcentaje de extracción del jugo mezclado [%]

fCM: Composición de fibra en caña molida [%]

fRL: Composición de fibra en el residuo leñoso [%]

HmdRL: Humedad del residuo leñoso [%]

JM: Flujo de jugo mezclado [kg/h]

ME: Composición de materia extraña [%]

PCR: razón de la capacidad del proceso

perdRL: Pérdidas en el residuo leñoso [%]

PMol: Presión del último molino [kgf/cm^2]

Pol: Porcentaje de sacarosa [%]

polCM: Composición de pol en caña [%]

PolJM: Composición de pol del jugo mezclado [%]

polRL: Composición de pol del residuo leñoso [%]

RL: Flujo de residuo leñoso [kg/h]

Temp: Temperatura del agua de imbibición [$^{\circ}C$]

λ : Cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra en caña [kg/kg]

Resumen:

La presente investigación corresponde a la determinación del comportamiento operacional de la etapa de extracción del CAI: "México" correspondiente a un período muestreado de la zafra 2020-2021. De la misma resulta como problema operacional la inestabilidad en el flujo de caña, denotado por coeficiente de variación de 13,31% que dada su tendencia provoca que se incumpla con la molienda horaria normada. A su vez, ante tales variaciones no se reajusta consecuentemente la imbibición; mala práctica operacional que ocasiona grandes pérdidas de sacarosa. La composición de materia extraña es elevada, con valores superiores al 10% que conlleva a ineficiencias en la extracción y al incumplimiento de la humedad del bagazo. No se controla la temperatura del agua de imbibición dada la inexistencia de un termómetro en el área; para la muestra observada del proceso presentó una alta variabilidad denotado por un coeficiente de variación del 22,75%. El flujo de caña molida y su composición de pol, la temperatura del agua de imbibición, la pol y humedad en bagazo se encuentran en control estadístico sin embargo son incapaces de satisfacer lo normado; ninguna variable analizada presenta un índice de capacidad superior a uno. La indisciplina tecnológica, el incumplimiento con la calidad de la caña, una pobre instrumentación y el déficit en el suministro de caña son los principales problemas detectados en el área. Se establecen en base a los problemas detectados un conjunto de medidas de ámbito técnico, logístico y de recursos humanos cuya correcta implementación permite la erradicación o mitigación de los mismos.

Abstract:

This research corresponds to the determination of the operational behavior of the CAI extraction stage: "Mexico" corresponding to a sampled period of the 2020-2021 harvest. The operational problem results from the instability in the sugarcane flow, denoted by a coefficient of variation of 13,31% which, given its trend, causes the standard hourly grinding to be breached. In turn, when faced with such variations, the imbibition is not adjusted accordingly; poor operational practice that causes large losses of sucrose. The composition of foreign matter is high, with values higher than 10% that lead to inefficiencies in the extraction and non-compliance with the humidity of the bagasse. The temperature of the imbibition water is not controlled given the absence of a thermometer in the area; for the observed sample of the process, it presented a high variability denoted by a coefficient of variation of 22,75%. The flow of ground cane and its composition of pol, the temperature of the imbibition water, the pol and moisture in bagasse are in statistical control, however they are unable to satisfy the norm; No variable analyzed presents a capacity index greater than one. Technological indiscipline, non-compliance with the quality of the cane, poor instrumentation and the deficit in the supply of cane are the main problems detected in the area. Based on the problems detected, a set of technical, logistical and human resources measures are established, the correct implementation of which allows their eradication or mitigation.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico	4
1.1 Generalidades del proceso de producción de azúcar crudo.....	4
1.2 Etapa de extracción del proceso de producción de azúcar crudo	7
1.3 Proceso de imbibición en la etapa de extracción	11
1.3.1 Temperatura del agua de imbibición	14
1.3.2 Imbibición óptima.....	16
1.4 Valores típicos de las variables y parámetros operacionales de la etapa de extracción.	18
1.5 Control del proceso de fabricación.....	21
Capítulo 2: Materiales y Métodos	25
2.1 Descripción del proceso tecnológico del CAI: México	25
2.1.1 Descripción de la etapa de extracción del CAI: México	26
2.2 Selección de los parámetros para el control estadístico del proceso.....	27
2.2.1 Obtención de la información experimental	29
2.3 Análisis del comportamiento operacional de la etapa de extracción.....	31
Capítulo 3: Análisis de los resultados	37
3.1 Caracterización estadística básica y análisis del proceso preliminar a partir de la información experimental	37
3.2 Pruebas de normalidad de las observaciones	45
3.3 Pruebas de hipótesis.....	49
3.4 Gráficos de control de las principales variables operacionales del proceso	52
3.5 Índices de capacidad de proceso.....	56
3.6 Asignación de las causas a los principales problemas tecnológicos detectados.....	62
3.7 Propuesta de un plan de medidas que permitan una mejora del comportamiento de la etapa de extracción.....	65
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	70
Referencias bibliográficas	71
Anexos	76

Introducción

Las industrias químicas ocupan un importante rol en el desarrollo socioeconómico del mundo. Debido al incremento de las preocupaciones medioambientales, la comunidad científica se esfuerza sistemáticamente en el empleo de soluciones sustentables para la industria química en cuestión (Safder, Ifaei, & Yoo, 2020).

La industria del azúcar de caña comprende más de 1500 fábricas en 75 países, 72 de ellos en desarrollo o subdesarrollados. Se producen actualmente unos 135 millones de toneladas métricas de azúcar y 40 millones de toneladas métricas de alcohol (Gálves & Otero, 2019). América Latina y el Caribe constituye la principal región productora de caña de azúcar del mundo, con más del 50% de la producción (Marín et al., 2018).

La industria azucarera cubana representa históricamente un sector de significativa influencia en el desarrollo productivo del país (Rosales-Genet, Clavelo-Sierra, Morales Zamora, & González Cortés, 2020). Un aspecto importante que se le confiere al proceso de producción de azúcar es el control de proceso, elemento que a nivel internacional es objeto de investigación en las industrias de procesos (Cabrera & Gómez, 2011).

El tema de la reducción de los gastos fabriles, incide en el costo de la producción, y es de vital importancia para lograr que las industrias desarrollen sus operaciones con eficiencia; es por eso que el control estadístico de proceso debe emplearse sistemáticamente como herramienta de análisis. Este permite reducir la variabilidad del proceso productivo (Cabrera & Gómez, 2011).

En los momentos actuales es un imperativo alcanzar la máxima eficiencia en los procesos industriales, sobretodo en aquellos que tributan a exportaciones y recaudación de divisas; tal como sucede con el de fabricación de azúcar de caña. Para ello, en aras de tomar acciones ingenieriles que permitan una mejora de la producción deben diagnosticarse y conocerse los principales problemas y desempeño de las distintas áreas que constituyen el proceso.

Entre ellas debe prestarse vital atención al área de extracción, muy compleja tecnológicamente; ya que constantemente recibe perturbaciones de inestabilidades en la calidad de la materia prima y en la molida. Incorrectas acciones operacionales, sobretodo en la dosificación de la imbibición son causantes de bajos recobrados de azúcar, de disminución de la disponibilidad de vapor, de afectaciones en la clarificación y/o de sobrecargas al sistema de evaporación.

Lamentablemente no existe en muchos centrales azucareros una disciplina ingenieril en este sentido y solo el control operacional se basa en el reporte horario de la contabilidad azucarera a través del monitoreo de parámetros operacionales elementales. No se analiza de forma sistemática y continua el comportamiento y fluctuación de las variables operacionales ni su interrelación entre ellas. Ello hace que en última instancia no se detecten exhaustivamente las principales deficiencias tecnológicas y que se incurran en malas decisiones operacionales. En tal sentido se presenta el problema científico siguiente:

¿Cómo determinar el comportamiento operacional de la etapa de extracción del Central Azucarero “México”?

Para darle solución se tiene la siguiente hipótesis:

Con el análisis de los principales parámetros operacionales de la etapa de extracción se podrá entonces conocer el comportamiento de la etapa de extracción.

Se define como objetivo general:

Evaluar el comportamiento de las principales variables operacionales de la etapa de extracción del Central Azucarero México

Para lo cual se tienen como objetivos específicos:

1. Analizar la influencia de las principales variables operacionales en el comportamiento de la etapa de extracción

2. Determinar los problemas y violaciones operacionales en el área mediante herramientas del control estadístico de la calidad.
3. Establecer una propuesta de acciones que contribuyan a mitigar las dificultades e insuficiencias que se detecten.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En este capítulo se realiza un análisis bibliográfico que constituye el basamento teórico de la presente investigación. Se abordan aspectos de gran relevancia para la misma como son: el proceso tecnológico en cuestión con especial detenimiento en la etapa de extracción y su normalización; así como la influencia de la imbibición y elementos generales del control del proceso.

1.1 Generalidades del proceso de producción de azúcar crudo

La producción de azúcar crudo es un complejo proceso físico-químico, de naturaleza multivariable, con relaciones muy cambiantes entre sus flujos materiales y energéticos. El proceso de producción se desarrolla en instalaciones tecnológicas, con gran influencia recíproca donde se realizan las transferencias de masa y energía que culminan con la producción del azúcar (Mulet & Fernández, 2016).

El proceso de producción de azúcar es capaz de autosatisfacerse energéticamente, mediante el empleo del bagazo como combustible y de un sistema de cogeneración acoplado (Dogbe, Mandegari, & Görgens, 2018). Este proceso demanda una enorme cantidad de energía para la producción de azúcar, especialmente calor (Assawamartbunlue, Kunrapeegayson, & Limwattana, 2018).

El esquema energético de una fábrica de azúcar de caña necesita consumir una alta cantidad de energía térmica, de la cual casi el 80% del total se utiliza para calentar, evaporar, concentrar y cristalizar los productos azucareros y una menor proporción de energía mecánica (fundamentalmente transformada en eléctrica), que puede obtenerse mediante la elevación de la presión del vapor de proceso; previo a su utilización en el mismo para calentar (Lodos, Sabadí, & Rostgaard, 2019). En los llamados centrales azucareros con cogeneración tradicionales, los generadores de vapor tienen presiones y temperaturas de trabajo bajas, del orden de los 20-30 bar (2-3 MPa) y 300-400 °C respectivamente (Birru, Erlich, & Martin, 2019).

El vapor de baja presión se utiliza en el proceso para calentar, lo que representa el 75 - 80% del total de vapor. El 20 - 25% restante va directamente del generador de vapor a turbinas o a una válvula reductora y de ahí, al proceso, como vapor de baja presión o “de escape”. Otra fuente de vapor de baja presión es el que se produce en los evaporadores. Con una administración adecuada de todos estos vapores se intenta amortiguar las variaciones que produce el abastecimiento de caña y la operación del proceso, sobre todo en su etapa usualmente discontinua (Lodos et al., 2019).

En el proceso de fabricación del azúcar crudo de caña se obtiene, inevitablemente, gran cantidad de condensado vegetal, utilizable como agua de reposición en la generación de vapor y en otros sistemas del proceso. Ello es posible por las características propias de la materia prima, que contiene aproximadamente 75% de agua del total de su peso, y al uso de los esquemas energéticos tradicionales (Rodríguez & Batista, 2009).

Las etapas principales del proceso de producción de azúcar crudo son: extracción, alcalización, calentamiento, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugación y generación de vapor.

La caña se descarga en la fábrica en un basculador, con una secuencia sincronizada de tal manera que la alimente de forma estable y adecuada. En el camino del basculador a los molinos, la caña se “prepara” o desintegra para romper su estructura fibrosa, favorecer la extracción del jugo que contiene, y elevar la capacidad de molida. La preparación la inician, convencionalmente, uno o dos juegos de cuchillas giratorias que logran un índice de preparación del orden del 60%, como promedio. No obstante, existe comúnmente en los centrales azucareros, una desfibadora llamada “desfibadora pesada” (costosa y alta consumidora de energía) que eleva el índice hasta 90 - 95% e incrementa la molida en un 30% (Casanova, Almazán, & Lodos, 2019).

Luego, la caña de azúcar se somete a un proceso de molienda. De esta etapa se obtiene el jugo, que contiene el azúcar dirigida hacia el proceso de fabricación y

bagazo, que se emplea como combustible para generar energía térmica y electricidad (Bernardi, 2019; Herrera, Rúa, & Lechón, 2015). La potencia eléctrica producida del sistema de cogeneración usualmente excede la demanda interna del central; cuyo exceso se envía al sistema electro-energético nacional (Chantasiriwan, 2016; Meghana & Shastri, 2020).

El jugo que se obtiene de la molienda de la caña es ácido (pH alrededor de 5,4 - 5,7), turbio y de un color carmelita oscuro. Este tiene entre un 12 - 18% en peso de sacarosa (según la madurez de la caña) impurezas solubles e insolubles y de 0,5 - 3% de azúcares reductores (Eggleston, Legendre, & Godshall, 2017).

El jugo mezclado que se obtiene en la extracción se calienta previamente para aumentar la eficiencia de la clarificación (Mohammed, 2018). La clarificación se efectúa para la remoción máxima posible de turbidez, para lo cual se emplea calor, cal y floculante (Eggleston et al., 2017). La lechada de cal se adiciona hasta neutralizar el pH del jugo (Sunori et al., 2016).

Los lodos de la clarificación aún contienen una cantidad significativa de sacarosa; razón por la que estos son sometidos a un proceso de filtración. Ello se desarrolla en filtros rotarios al vacío, a muy baja velocidad de rotación entre 4 y 6 rpm (Kumar, Yadav, & Kumar, 2020). Para ello se emplea agua como agente de lavado y bagacillo para aumentar la compresibilidad de la torta. De esta etapa se obtiene jugo filtrado (el que se recircula al proceso) y cachaza como producto de salida.

Posteriormente, en la evaporación, el jugo es concentrado de 14 -18 °Bx a 60 - 65 °Bx (Mohammed, 2018). Ello implica una cantidad significativa de energía a consumirse por el alto contenido energético del calor latente de vaporización y las propias cantidades de agua a ser separadas (Mkwananzi, Mandegari, & Görgens, 2019). Para ello intervienen evaporadores a simple efecto (pre-evaporadores) y evaporadores a múltiple-efecto. De esta etapa se obtiene un material viscoso y concentrado denominado meladura.

En la cristalización, se procede a continuar el proceso de evaporación, a simple efecto y en condiciones de vacío controladas en equipos denominados: tachos. De esta etapa se obtiene azúcar comercial y miel final. Pueden practicarse diferentes esquemas de cristalización, lo que da lugar a específicos sistemas de masas cocidas.

Las pérdidas de sacarosa en mieles finales son las mayores del proceso y por lo tanto es importante reducirlas a los valores mínimos posibles. Dependen de innumerables factores que van desde la calidad de la caña, temperaturas inadecuadas en el proceso, pH bajos o altos, entre otras (Pérez, Goza, Santana, & Pérez, 2005).

1.2 Etapa de extracción del proceso de producción de azúcar crudo

La operación de los molinos es esencial para el proceso de producción de azúcar crudo. En la etapa de molienda de caña se separa el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña. En los molinos la caña se somete a elevadas presiones entre pares de mazas o rodillos consecutivos (Rein, 2012). En la molienda, más de un 95% del azúcar que entra con la caña pasa a formar parte del jugo mezclado (Balla, Rabah, & Abdallah, 2018).

El objetivo del proceso de molienda en cada molino es maximizar la extracción a expensas de minimizar las pérdidas de sacarosa en el residuo leñoso, el consumo de energía y el porcentaje de humedad del residuo. Para ello se requiere que cada uno de los molinos operen en valor máximo de altura de la tolva de alimentación, de una cantidad óptima de agua de imbibición, así como de un adecuado ajuste en los molinos (Rosero & Ramirez, 2009).

El área de extracción es donde más se dificulta mantener condiciones sanitarias idóneas. La caña desfibrada y sus jugos, ricos en nutrientes, resultan ideales para el ataque de microorganismos. Se desarrollan microorganismos como: *Leuconostoc mesenteroides* y *Bacillus subtilis*; los que producen pérdidas de azúcar en el proceso por la acción de los oligosacáridos y polisacáridos que

forman (Casanova et al., 2019). Entre estos compuestos indeseables que afectan el rendimiento industrial se encuentran: la dextrana, el manitol y el ácido láctico (Eggleston et al., 2017).

La potencia requerida por el molino depende del grado de desintegración del material que recibe (Barreiro, 2011). El mismo se pesa y se transporta por medio de bandas a la etapa de preparación, donde se utilizan desfibradoras o picadoras para impactar los tallos y reducirlos de tamaño (Rosero, Ramírez, & León, 2008).

Una buena preparación de la caña favorece extraordinariamente el trabajo de la planta moledora, lo que implica cuantiosos beneficios económicos (Junco, 2011). A partir de una caña razonablemente bien preparada, es posible extraer normalmente entre 60 - 75% de la sacarosa mediante un primer molino convencional. Para permitir a los molinos siguientes extraer mayor cantidad de sacarosa se añade al bagazo agua adicional; proceso denominado: imbibición (Rein, 2012).

El primer molino normalmente se concibe para alcanzar máxima extracción, en ocasiones por razones de pago, pero principalmente porque una elevada extracción en este es esencial para alcanzar un buen desempeño del tren. El molino final es también importante, dado que es la "puerta de salida" y a través de él, se pretende minimizar las pérdidas en bagazo y la humedad (Rein, 2012).

El índice de preparación de la caña está relacionado con la proporción de células abiertas cuya influencia se puede medir a través del porcentaje de sacarosa, el porcentaje de humedad del residuo leñoso y la demanda de potencia del tándem. Entre mayor sea este, más acceso tendrá el agua de imbibición al jugo, que en otro caso, solo se diluiría por difusión a través de las paredes y las membranas celulares (Corrales-Suárez, Gil-Ortiz, Remédios-Castañeiras, Masjuan-Leyva, & Alexander Gil-Ceballo, 2015).

Hugot (2014), discute que el picado de tallos enteros de caña puede conducir a ganancias en capacidad, mas no a ganancias en extracción. Con frecuencia, se

cree que la preparación de caña es menos importante en un tándem de molinos que en la difusión debido a la reducción adicional del tamaño de partículas que se obtiene en los molinos. Sin embargo, esto no es cierto, dado que los molinos pueden reducir el tamaño de las partículas de caña, pero sin eliminar los pedazos más grandes.

Ello fue claramente demostrado, según Batule (2009). En este el autor refiere un estudio desarrollado por Moor (1974), el cual demostró cómo los pedazos más grandes de caña persistieron en el bagazo de un tándem de molinos y que estos pedazos contenían tres veces más azúcar que las partículas de menor tamaño. Para ambos procesos, molienda y difusión, un mayor rompimiento de las células que contienen azúcar resulta en una mayor extracción y en menor humedad del bagazo final. Esta última mejora la extracción y produce un material combustible que quema mejor en las calderas (Rein, 2012).

La estructura de la caña de azúcar tiene una marcada influencia sobre los resultados de la molienda. Con una molienda eficiente, algunas cañas producen bagazo que contiene un 50% de fibra y 45% de humedad. Otras cañas en cambio, al ser molidas en los mismos molinos ajustados de la misma forma y con una eficiencia aparentemente igual, producen un residuo leñoso con un contenido de fibra del 45 y 50% de humedad. El porcentaje de fibra tiene una influencia notable sobre la extracción; a mayor cantidad de fibra, menor extracción, bajo la misma eficiencia de molienda (Batule, 2009; Rein, 2012).

Entre las áreas de mayor consumo de energía en un central azucarero se encuentra el tándem de molinos. Una de las variables que influye en este consumo de energía es la presión hidráulica aplicada a la maza superior (Corrales-Suárez et al., 2015).

Según Batule (2009) la presión hidráulica sobre la maza superior es solamente uno, de los muchos factores que determinan la extracción del molino y la humedad del bagazo; y no es el más importante. El ajuste de los molinos, ranurado de las

mazas, drenajes de jugo, velocidad de la maza, ajuste del tornabagazo y alimentación al molino juegan un papel más importante en el trabajo del molino.

Las presiones máximas se aplican generalmente en el primero y último de los molinos. Los molinos intermedios pueden operar con presiones iguales o inferiores a las del primero y último, en dependencia de las condiciones mecánicas y físicas del tándem y de la preparación de la caña (Herrera, Zuazaga, & Díaz, 1996).

Cuando un molino trabaja cerca de su máxima capacidad, una pequeña falla a menudo es suficiente para provocar problemas operacionales. La multiplicidad de las posibles causas complica la tarea de localizar la causa exacta del problema, y algunas veces pasan varias semanas de zafra antes de que pueda ser remediado (Batule, 2009).

De otra mano, algunas veces es imposible aplicar la imbibición deseada en un molino que trabaja a plena capacidad. Consecuentemente, los ingenieros de proceso tienden cada día más al uso de la alimentación forzada. Ello consiste en el uso de un aparato especial que fuerza al bagazo a entrar al molino. Tal equipo es generalmente del tipo rotatorio y se le llama rodillo de alimentación (Batule, 2009).

Para un central azucarero, el indicador de bagazo sobrante con respecto al porcentaje de bagazo disponible no debe ser cero, pues ello significa que hay que usar un segundo combustible e implica un elevado costo adicional. En condiciones normales de operación es necesario disponer de cierta cantidad de bagazo sobrante para operar durante paradas de la molienda, de hasta dos o tres horas de duración, debido a interrupciones operativas o falta de caña. Con solo el 5% del bagazo sobrante se puede operar durante tales paradas; por lo cual se debe garantizar un mínima cantidad de bagazo destinada para tales condiciones (Jiménez, Monteagudo, & Lorenzo, 2017).

El porcentaje de humedad del residuo leñoso es un parámetro que se afecta por el aumento de la materia extraña y que disminuye el índice de generación de las

calderas (cantidad de vapor generado por cantidad de bagazo consumido) (Navarro & Rostgaard, 2014). Ello se debe a que, una mayor cantidad de la energía entregada por el combustible (bagazo) debe consumirse para alcanzar las condiciones de ignición del bagazo alimentado.

Las mejoras que se logran al reducir la materia extraña o al aumentar la pureza del jugo pueden conducir a un incremento adicional de la capacidad efectiva, sin costos de capital. Los no azúcares son esencialmente más difíciles de extraer que la sacarosa. Esto se evidencia en el hecho de que el jugo extraído en el primer molino tiene siempre una mayor pureza que el jugo diluido, mientras que el jugo extraído al final del tren de molinos es siempre el de menor pureza. El jugo residual que queda en el bagazo tiene, hasta inclusive una menor pureza (Rein, 2012).

1.3 Proceso de imbibición en la etapa de extracción

Aun cuando el bagazo se someta a elevadas y repetitivas presiones, nunca llega a extraerse todo el jugo que contiene. Si el mismo tiene un 45% de humedad como mínimo (en general), se retiene una proporción alta de jugo que es aproximadamente igual a la mitad de su peso. Para extraer tanto como sea posible el azúcar que contiene el jugo remanente en el bagazo, este se reemplaza con agua; proceso denominado: imbibición (Batule, 2009; Hugot, 2014).

La aplicación eficiente del sistema de imbibición es tan importante para la extracción en el tándem como la aplicación de fuertes presiones en los dos primeros molinos. A partir del segundo molino, si se aplica solo presión hidráulica sin imbibición, se nota que no se gana en extracción porque el bagazo retiene una cantidad de jugo; que es necesario diluir con el fin de reducir el contenido de sacarosa remanente en el bagazo (AZCUBA, 2013; Barreiro, 2011).

Cuando se muele en seco, el límite de extracción se obtiene muy rápido en la práctica: después de la desmenuzadora y el primer molino, la humedad del bagazo se reduce hasta casi un 60%, después del segundo molino, se acerca al

50% mientras que después del tercer molino, es aproximadamente del 45%. En este último punto, puede considerarse que con la aplicación simple de la presión (presión seca) ya se alcanza la extracción máxima posible a tales condiciones. Si en esta etapa, el bagazo se rocía con agua, la misma se distribuye en el bagazo y diluye al jugo que el mismo contiene. El molino siguiente, entonces, recobrará el azúcar hasta la humedad límite, la que no consiste en jugo absoluto sino de jugo diluido o jugo residual, con menos contenido de azúcar (Batule, 2009; González, Castellanos, & Puertas, 2010; Hugot, 2014).

La cantidad de agua utilizada como imbibición varía ampliamente entre diferentes industrias azucareras, desde un 15% a un 60% de la caña. La mejor fuente de agua para uso de imbibición es el condensado y preferentemente a una temperatura tan alta como sea posible. Con difusores se utiliza imbibición a aproximadamente 80 °C. Algunos trenes de molinos también son capaces de utilizar condensado caliente, pero muchos operadores optan por utilizar una temperatura menor (Cortés, Vicente, Pedraja, & Suárez, 2015).

✓ Imbibición simple:

El procedimiento más simple consiste en añadir el agua al bagazo después de cada molino. Si el agua se añade en dos puntos, entre el penúltimo molino y el precedente, se le denomina al sistema como imbibición simple doble. A modo semejante, pero con la incorporación de agua a la entrada de los tres últimos molinos se le denomina imbibición simple triple y así análogamente para otras combinaciones. Este sistema, sin embargo, consume mucha más agua (que debe ser posteriormente evaporada); razón por la cual es muy poco empleado en la práctica (Hugot, 2014).

✓ Imbibición compuesta:

La imbibición compuesta en cambio, implica la adición del agua de imbibición generalmente a la entrada del último molino y la recirculación sucesiva del jugo

extraído hacia la entrada del molino inmediato anterior hasta el segundo molino; en el que se obtiene el jugo diluido (Eggleston et al., 2017; Hugot, 2014).

La siguiente figura muestra un esquema representativo de la imbibición compuesta:

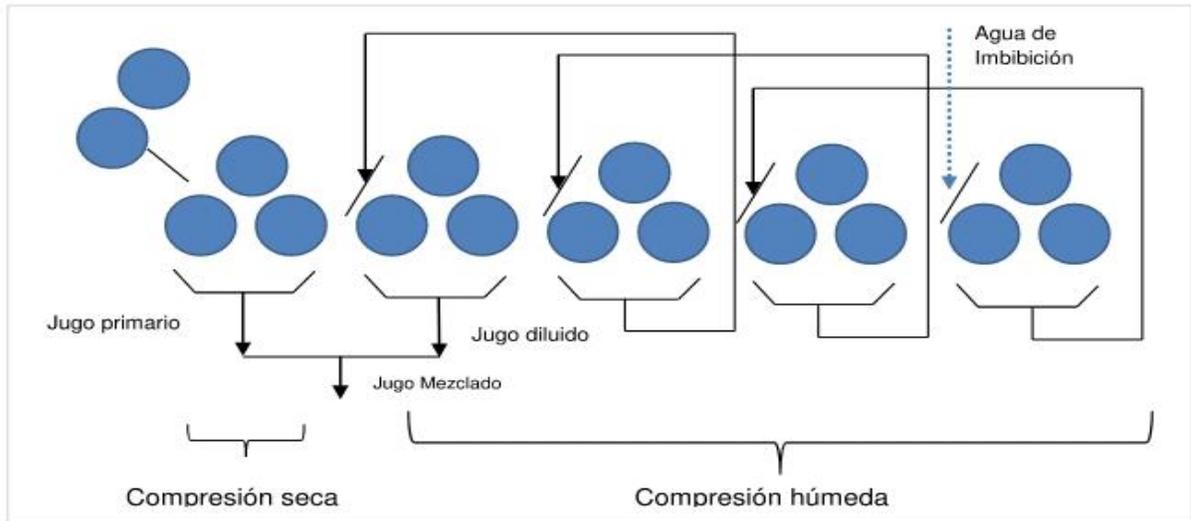


Figura 1.1: Imbibición compuesta.

Actualmente la operación de añadir la imbibición y los jugos de esta se realiza generalmente en el punto inmediato posterior de la salida del colchón de bagazo de las mazas superior y bagacera. Este jugo comienza inmediatamente a percolar a través del colchón a una velocidad que dependerá de su grado de preparación; es decir, en base a la distribución granulométrica de sus partículas. El molino que recibe este material efectúa su compresión a un material heterogéneo y extrae rápidamente el jugo depositado en el extremo inferior del colchón (Batule, 2009).

Es importante que la imbibición se aplique tan uniformemente como sea posible sobre el flujo de bagazo (Junco, 2011). Se debe distribuir el líquido de imbibición a través de la altura del colchón de bagazo. Independientemente del sistema de aplicación utilizado, el mezclado siempre es incompleto y existe una distribución no uniforme de los sólidos disueltos en el jugo contenido en la alimentación del molino siguiente. El jugo más diluido de imbibición, que se adiciona en la

superficie superior, es más fácil de extraer que aquel que ya se encuentra embebido en la caña. Como resultado de esto, el porcentaje de sólidos disueltos extraído por un molino es generalmente más bajo que el porcentaje de sólidos disueltos del jugo residual libre que quede en el bagazo que se descarga del molino. Ello da lugar al concepto de eficiencia de imbibición, que se define como el porcentaje de sólidos disueltos del jugo extraído entre el porcentaje de sólidos disueltos del jugo residual (Rein, 2012).

Con el incremento de la imbibición, debe existir un incremento en la caída de pureza. La extracción de no azúcares decrementa la pureza del último jugo extraído (Londhe, Kale, Dixit, & Raj, 2020) .

1.3.1 Temperatura del agua de imbibición

La alta temperatura es responsable de fundir ceras que incrementan el deslizamiento de las mazas y dificultan alcanzar la producción propuesta. Algunas fábricas muestran que la imbibición en caliente puede ser ventajosa para incrementar la extracción, dado que dichas fábricas poseen mazas con tracción adecuada. Si se requirieren temperaturas menores de imbibición, es mejor enfriar el condensado a través del precalentamiento del jugo crudo mezclado. Esto mejora la eficiencia energética y no incrementa la carga de impurezas en el jugo crudo (González, Alomá, Espinosa, & González, 2014). Eggleston et al. (2017) refiere que las altas temperaturas ayudan a prevenir el crecimiento microbiano, aunque también puede incrementar el color del jugo.

En Alvarez, Llanes, Cortés, y Perdomo (2019) se refiere de forma muy precisa la incidencia negativa de elevadas temperaturas del agua de imbibición (del orden de los 100 °C) en el central azucarero Siboney (Camagüey, Cuba) por problemas técnicos en el intercambiador de calor líquido-líquido. Plantea que la elevada temperatura hace que: “el agua de imbibición funda la cera contenida en la caña, las mazas se emboten y patinen, se acumulen grandes cantidades de meollo en las bandejas y se mantenga latente el riesgo de que el bandejero sufra un accidente, acelerando el desgaste de las mazas”.

La mejor temperatura para el agua de imbibición es un tema ampliamente debatido y aún no se alcanza una conclusión unánime al respecto. Los partidarios de la imbibición fría (temperatura ambiente hasta 50 °C) argumentan que ello propicia una mejor alimentación. Ciertas ceras de la caña se funden o "derriten" a aproximadamente 60 °C y hacen que el bagazo sea más resbaloso. Sin embargo, las técnicas modernas para dar rugosidad a las mazas son capaces de superar este problema (Rein, 2012).

Coinciden Hugot (2014) y Batule (2009) en que la temperatura del agua de imbibición tiene poco efecto en la vecindad de los 60 y 70 °C. Por encima de este punto, la eficacia de la imbibición es ligeramente superior con agua caliente. Los que apoyan la imbibición en caliente explican la acción de la temperatura sobre la destrucción de los tejidos de las células de la pared por el calor. El material de las células de la pared, el cual es impermeable, o permeable solamente por osmosis, puede suavizarse, y el agua entonces tiene un acceso directo al jugo contenido en las células. Se pueden hacer notar los puntos siguientes, según Hugot (2014) y Batule (2009):

- ✓ Se obtiene una ligera ganancia en la extracción por el uso del agua caliente.
- ✓ Los molinos no se alimentan tan bien con agua caliente como con agua fría. Cuando en la planta está en operación un alto flujo de caña relativo a la capacidad normal de los molinos, y se usa una imbibición alta, el rendimiento se afecta más rápido con agua caliente que con la fría.
- ✓ La imbibición con agua caliente tiene la gran ventaja del ahorro de agua fría y de facilitar el empleo de condensados calientes.
- ✓ La temperatura óptima al parecer es de unos 80 y 85 °C.

Según Batule (2009) la imbibición con agua caliente (72 - 85 °C), disminuye el color del jugo claro, probablemente debido a la cera adicional que se extrae, la cual absorbe color, sin embargo, aumenta la turbidez a valores mayores de 0,2% en el jugo tratado.

Hoing (1987) afirma que: “la imbibición en caliente trae ventajas definitivas para la eficiencia de extracción de azúcar de los molinos”. Probablemente, la mayoría de los ingenieros se identifica con esta visión, pero el mejoramiento que se obtiene con agua caliente (por encima de 50 °C) es en general muy pequeño como para ser determinado claramente. Hoing (1987) destaca además que, experimentos en Java mostraron que el agua de imbibición entre 85 y 95 °C no extrajo ninguna cantidad de cera adicional que el agua a 28 °C.

El uso de temperaturas elevadas es beneficioso, pues permite incrementar la tasa de extracción al aumentar la difusividad molecular y reducir la viscosidad del líquido. Sin embargo, este efecto no es tan importante como el efecto de la preparación y el flujo de líquido. La razón más importante para mantener la temperatura por encima de 75 °C es el control de la actividad microbiana. Los difusores generalmente son operados alrededor de 85 °C, lo que permite el uso de vapor extraído de los evaporadores para propósitos de calentamiento (Rein, 2012).

La humedad del bagazo se incrementa ligeramente con la cantidad de agua de imbibición (Batule, 2009). 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 autoevaporación y por ende menor humedad (Pérez de Alejo et al., 2009).

1.3.2 Imbibición óptima.

La cantidad de agua de imbibición a utilizar para un sistema de extracción por compresión dado depende fundamentalmente de la composición de la caña y de la relación del precio del azúcar con el precio del combustible. Un incremento en la cantidad de agua de imbibición utilizada trae consigo ventajas desde el punto de vista de extracción de azúcar ya que disminuye el contenido de sacarosa en el bagazo; sin embargo, provoca un incremento considerable del vapor necesario para evaporar esa agua (González et al., 2010; Lodos et al., 2019).

En la mayoría de las fábricas, la cantidad de agua de imbibición total que puede ser aplicada está limitada por la capacidad de los evaporadores, la capacidad de las calderas y por el balance de combustible.

El drenaje de los molinos puede constituir el factor limitante para procesar bagazo más “mojado”, lo que se ha manifestado en frecuentes experiencias donde elevados valores de imbibición conducen a mayor contenido de humedad en bagazo. Sin embargo, es más probable que la tasa de imbibición esté limitada por restricciones en otras partes de la fábrica tales como clarificadores, evaporadores o calderas (incluyendo el balance de combustible) (Rein, 2012).

En los estudios realizados se observa que la “mejor” imbibición se alcanza a valores de cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra igual a dos. La extracción se incrementa rápidamente a medida que la cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra se incrementa desde cero a uno, aún bastante rápidamente desde uno a dos; pero por encima de dos es muy lento el incremento. Raramente hay poca ventaja en pasar de tres, y casi nunca es ventajoso pasar de cuatro (Hugot, 2014).

Sin embargo, en pruebas realizadas en *Audubon Sugar Institute* en Lousiana (Estados Unidos) se halló que la extracción se incrementa rápidamente con la imbibición en las cercanías del 30% (cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra en el intervalo desde 2,0 a 2,5).

Experimentos teóricos (simulaciones) realizados en Australia mostraron que un máximo podría ser un valor de tres veces la cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra para un tándem de 5 molinos, o un valor de 2,5 para un tándem de 6 a 7 molinos; y que el efecto de la cantidad de imbibición disminuye cuando el número de molinos se incrementa (Batule, 2009).

1.4 Valores típicos de las variables y parámetros operacionales de la etapa de extracción.

Un documento normativo muy importante en la industria azucarera cubana es el Manual de Operaciones del 2013, el cual refiere los valores normativos por los cuales se rige la misma y que son dictaminados por el grupo empresarial AZCUBA. Este documento, en la sección correspondiente al área de extracción, plantea que la cantidad óptima de agua de imbibición a aplicar debe ser de 1,8 - 2,0 veces el contenido de fibra en la caña; dado por un compromiso entre la extracción de sacarosa y los requerimientos de evaporación (AZCUBA, 2013).

El flujo de agua de imbibición debe estar entre 180 - 200% de la fibra en caña (Cortés Falcón, Cornes Izquierdo, Alomá Vicente, & González Suárez, 2019; Herrera et al., 1996; Junco, 2011); aunque si fuera necesario, se debe aplicar más del 200% de la fibra en caña para no sobrepasar el porcentaje de sólidos disueltos de 15 °Bx en el jugo mezclado. Coincide con este criterio Arca et al. (1988), debido a que en la operación práctica se comprueba que cuando se muelen cañas con alto contenido de fibra, es posible y necesario aumentar la cantidad de agua de imbibición.

En cambio, para Thaval (2012), la cantidad típica a adicionar es entre 200 - 300% de la fibra en caña. Autores como ICIDCA (2012) y Ordóñez (2004) presentan valores de agua, de 180 - 220% y 270% en fibra respectivamente. Casanova y Alonso (2006), establecen valores de agua de imbibición de 180 - 280% de fibra.

Además del agua de imbibición añadida, otra de las variables fundamentales analizadas en el área de extracción es el contenido de sólidos disueltos del jugo mezclado. Según AZCUBA (2013), el mismo debe oscilar entre 13 - 15 °Bx. El término superior se restringe por la velocidad de clarificación mientras que el inferior por la sobrecarga al sistema de evaporación que ello supone; Barreiro (2011) coincide con este criterio.

Según Junco (2011), el contenido de sólidos disueltos del jugo mezclado debe estar próximo a 15 °Bx mientras que para Herrera et al. (1996) y Cortés Falcón et al. (2019) no debe ser mayor de 15 °Bx. Sin embargo, Casanova y Alonso (2006) presentan valores de 13,5 - 16,5 °Bx; algo superiores a los anteriores.

El contenido de sólidos disueltos del jugo primario y el del último jugo extraído también son valores controlados. El primero debe oscilar de 15 - 25 °Bx y el último debe ser menor a 10 °Bx (AZCUBA, 2013). Carrazana (1987) plantea intervalos bastante cercanos a los anteriores, para el primer jugo extraído, valores entre 16,5 - 23 °Bx y para el último jugo extraído, entre 4,5 - 8,0 °Bx.

La norma establecida por AZCUBA (2013) para el porcentaje de fibra en caña es de 9 - 15%, lo que depende siempre de las características propias de cada caña. Según ICIDCA (2012) debe estar entre 12,0 - 13,0%. Casanova y Alonso (2006) refieren valores de fibra en caña entre 13,5 - 14,5%; superiores a los anteriores. Carrazana (1987) presenta un rango más amplio de 9,0 - 16,5%.

A ello refiere Gálves y Otero (2019) que el contenido de fibra difiere de una variedad a otra aunque, generalmente, sus valores se encuentran en el intervalo de 12 - 15% de la caña. El exceso de fibra trae como consecuencia un menor contenido de azúcar en caña, una mayor pérdida de azúcar en bagazo y un mayor consumo de agua de imbibición; pero unido a ello, una mayor disponibilidad de bagazo sobrante para otros usos. Una fibra insuficiente introduce el riesgo de tener que utilizar combustible adicional de otro origen, pues la caña tendría una alta proporción de agua y la menor cantidad de bagazo pudiera ser insuficiente para generar la energía necesaria para procesarla.

El residuo leñoso, según Pérez de Alejo et al. (2009), presenta de 40 - 53% de fibra. Casanova y Alonso (2006) refieren valores de 47 - 49%, mientras que Carrazana (1987) lo hace para un 43 - 47%.

Aun cuando el bagazo se someta a presiones considerables y repetidas, no cede jamás todo el jugo que contiene. Tiende hacia una humedad mínima de 50% en general y de 45% en los casos más favorables (Hugot, 2014).

Para Junco (2011) la humedad del bagazo debe ser de 50%. De hecho, el ingreso de bagazo al horno (hogar) del generador de vapor con un elevado porcentaje de humedad (superior al 50%) origina una cantidad excesiva de humo (Perán, 2001).

Arca et al. (1988) y Rodríguez (1997) presentan un intervalo de humedad de 45 a 52%, con el cual prácticamente coinciden Carrazana (1987) (refiere de 46 - 52%) y Ordóñez (2004) (refiere de 49 - 51%). Pérez de Alejo et al. (2009) acota en cambio, que la humedad del bagazo oscila entre 45 - 55%. Resulta de gran importancia controlar la humedad de este, ya que ello influye grandemente en su poder calórico, el que para una humedad del 50% es de 19 400 kJ/kg (Eggleston et al., 2017).

Las pérdidas de sacarosa en el bagazo dependen de la eficiencia de los molinos, de la humedad del bagazo y ligeramente del contenido de sacarosa en caña (Birru, 2016). Tales pérdidas usualmente se encuentran entre 1 - 2% (Perán, 2001). Para Casanova y Alonso (2006) el porcentaje de sacarosa en el bagazo se debe encontrar entre 1,5 - 2,0% mientras que para Arca et al. (1988) el intervalo ideal debe ser de 1,5 - 3,0%; según las condiciones locales.

Hugot (2014) plantea que la sacarosa del residuo leñoso no debe sobrepasar el 2,3% (aproximadamente). En molinos bien ajustados y con una imbibición eficiente, deben esperarse valores de esta entre 3 - 3,5% y aún inferiores, lo que minimiza las pérdidas en bagazo (Hoing, 1987). Según Sahu (2018) el contenido de azúcares disueltos en este se encuentra típicamente entre 2 - 5%.

El contenido de sacarosa en la caña también es un valor normado por diversos autores. Según ICIDCA (2012), el porcentaje de sacarosa en caña debe oscilar entre 13,5 - 14,5% mientras que Casanova y Alonso (2006) plantean valores de 12

- 14%. La norma establecida por AZCUBA (2013) para esta variable es entre 10 - 16%.

En el jugo mezclado el contenido de sacarosa según Casanova y Alonso (2006) debe presentarse con valores entre 11,5 - 13,5%. AZCUBA (2013) plantea valores de sacarosa en el jugo mezclado de 9 - 17%; lo que representa un intervalo mucho más amplio que el anterior.

La presión hidráulica ideal para someter el colchón de caña o bagazo a una presión constante predeterminada de acuerdo con Arca et al. (1988) debe encontrarse entre 98 - 112 kgf/cm² (9 613,8 - 10 987,2 kPa), mientras que para Hugot (2014) debe ser de 100 - 110 kgf/cm² (9 810 - 10 791 kPa).

1.5 Control del proceso de fabricación

No se concibe proceso alguno sin la existencia de un sistema de control químico, pues con ello se cumple el objetivo de controlar el comportamiento de sus parámetros básicos para los análisis de los diferentes problemas que ocurren durante el desarrollo de la zafra y corregirlos con acciones inmediatas. La tendencia en los últimos años apunta la necesidad de fortalecer el trabajo de control e integrarlo a un sistema interactivo de acción rápida para corregir los problemas que cotidianamente ocurren en la producción. Ello evita así que la calidad del producto final se afecte (Martínez, Leiva, Carta, & Bravo, 2019).

El control químico en un central tiene como objetivos: asegurar la base estadística informativa con la confiabilidad requerida sobre los parámetros que se llevan al esquema de control; proporcionar cifras que indiquen la magnitud de las pérdidas que ocurren en la fábrica y acumular datos que permitan que el trabajo de la fábrica durante un período sea comparable con el de otros períodos y con el de otras fábricas (Martínez et al., 2019).

En la actualidad existen muchas herramientas que pueden utilizarse para las posibles mejoras y diagnósticos, pero una de las principales es el uso de técnicas estadísticas que vienen a lo largo de los años, mejorando todo el sistema

operacional además de permitir tornar los productos fabricados más competitivos (Hernández Pedrera & Da Silva Portofilipe, 2016).

La industria azucarera cubana necesita aplicar el control estadístico de proceso con el objetivo de adaptarse a las nuevas condiciones que exige el mercado mundial (Cabrera & Gómez, 2011).

Constituye una prioridad para la industria azucarera el análisis del costo y la eficiencia general del proceso de producción de la misma. Por la inestabilidad en los precios del azúcar, es necesario reducir los costos de producción. Esta situación está en correspondencia con las renovaciones a las que están sujetas las normas de calidad del producto, en función de los cambios y nuevas regulaciones que imponen las siempre crecientes exigencias del desarrollo de la ciencia y la tecnología, requisitos del mercado internacional azucarero. En la actualidad se considera que el mejoramiento del control y la disminución de los costos en su interrelación son fundamentales para lograr la efectividad económica de la industria azucarera; ante la necesidad manifiesta de un mayor aprovechamiento de las capacidades instaladas, para obtener mayores volúmenes de producción, con el mínimo de costos (Cabrera, de la Cruz, Gómez, & Rodríguez, 2015)

En el control de procesos se toman medidas para eliminar cualquier defecto o error antes de que ocurran aplicando métodos estadísticos o técnicas de cuatro tipos: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (Gupta, 2021). La aplicación de herramientas estadísticas son un medio, mas no un fin para controlar la calidad en los procesos de elaboración de producto bajo estándares establecidos (Torres, 2019).

Para la evaluación de la reducción de variabilidad, se pueden utilizar el control estadístico de procesos (con siglas en inglés: SPC de *Statistical Process Control*). El desarrollo de alternativas que permitan superar las dificultades y pérdidas encontradas fundamentalmente en la extensión de los gráficos de control, facilitan información más completa para monitorear los procesos industriales. Hacen a su

vez más efectiva la regulación del proceso, especialmente en los sistemas dinámicos, donde existe una demora entre el tiempo de cambio de la variable de entrada y el tiempo en que cambia la variable de salida (Cabrera et al., 2015).

Se define al control estadístico de procesos, como un concepto ligado con la calidad, considerada como una herramienta o técnica estadística que ayuda a determinar si un proceso se encuentra o no bajo control en términos estadísticos, lo cual permite monitorearlo y establecer parámetros para tener un mejor control (Flores, Espinoza, Gutiérrez, & Amado, 2017).

El control estadístico de proceso utiliza herramientas estadísticas para observar el rendimiento del proceso de producción, y de esta forma prever desviaciones importantes que puedan resultar en producciones deficientes (Cabrera & Gómez, 2011).

Un proceso industrial está sometido a una serie de factores de carácter aleatorio que hacen imposible fabricar dos productos exactamente iguales. Dicho de otra manera, las características del producto fabricado no son uniformes y presentan una variabilidad. Esta variabilidad es claramente indeseable y el objetivo es reducirla lo más posible o al menos mantenerla dentro de unos límites. El Control Estadístico de Procesos es una herramienta útil para alcanzar este segundo objetivo. Dado que su aplicación es en el momento de la fabricación, puede decirse que esta herramienta contribuye a la mejora de la calidad de la fabricación. Permite también aumentar el conocimiento del proceso lo cual en algunos casos puede dar lugar a la mejora del mismo (Ruiz, 2006).

Las gráficas, diagramas o cartas de control permiten detectar la variación sistémica generada en un proceso de producción o en la prestación de un servicio con el objetivo de poder ser identificada y corregida antes de que ésta produzca una gran cantidad de partes, productos o servicios defectuosos (Pierdant Rodríguez & Rodríguez Franco, 2009)

Conclusiones parciales de la revisión bibliográfica

1. La etapa de extracción es altamente compleja, influye sustancialmente en el recobrado de azúcar y en la economía de vapor del proceso de fabricación.
2. Los valores normados de los parámetros y variables operacionales del área de extracción no deben tipificarse, todo lo contrario, estos son resultados de las condiciones y características intrínsecas del proceso productivo en particular donde se desarrolla la investigación.
3. El control estadístico de procesos constituye una potente herramienta de análisis para la mejora del comportamiento operacional de la etapa.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

En este capítulo se abordan los materiales y la metodología a seguir en la presente investigación. Metodológicamente se compone de tres etapas fundamentales. La primera concierne a la selección de las variables operacionales de la etapa de extracción para el control estadístico del proceso. La segunda etapa corresponde a la planificación del procedimiento experimental para la colección de la información del proceso y la última, al procesamiento estadístico de dicha información en el desarrollo del análisis estadístico del comportamiento operacional de la etapa de extracción. Esta investigación se efectúa en el CAI “México” de la provincia de Matanzas.

2.1 Descripción del proceso tecnológico del CAI: México

El proceso tecnológico del CAI: “México” se ajusta perfectamente con las características tecnológicas típicas del proceso de fabricación de azúcar, abordadas en el capítulo anterior.

El tándem de molinos posee cinco unidades de cuatro mazas cada uno, para la zafra correspondiente presentan un ajuste (comúnmente conocido por su denominación en inglés, “*setting*”) para procesar 3 800 000 kg de caña por día; que define una molienda horaria nominal ininterrumpida de 158 333,33 kg/h. El jugo mezclado proveniente de la etapa de extracción es precalentado en un calentador líquido-líquido que utiliza agua de retorno del tecnológico.

La alcalización en frío es característica de este central que posee un clarificador de tipo BTR (siglas de “bajo tiempo de retención”) con un diámetro seccional de 9,14 m (30 pies) y una altura de 2,85 m. Los calentadores del área de purificación son de tipo Webre. El calentador primario opera con la extracción de vapor del segundo vaso del cuádruple efecto como agente de calentamiento, el calentador secundario, con vapor vegetal del pre-evaporador mientras que el calentador rectificador lo hace con vapor de escape.

Existen generadores de vapor con capacidad nominal de 45 000 kg de vapor/h que operan a 310 °C y 1,81 MPa (18,5 kgf/cm²). La presencia de dos turbogeneradores que producen 4 MW-h y 1,5 MW-h de forma individual aportan al sistema térmico vapor de escape a una temperatura entre 121 - 124 °C y una presión entre 137 540 - 171 925 Pa (20-25 lb/pulg²). Este central aplica un sistema de cristalización de tres masas cocidas.

2.1.1 Descripción de la etapa de extracción del CAI: México

La caña se recibe en el basculador, donde se prepara a través de niveladores y martillos “rompebultos”, para facilitar el proceso de extracción en los molinos. El tándem de molinos está integrado por cinco unidades de cuatro mazas. Para la zafra correspondiente presentan un ajuste (comúnmente conocido por su denominación en inglés, “*setting*”) para procesar 3 800 000 kg de caña por día; que define una molienda horaria nominal ininterrumpida de 158 333,33 kg/h.

El primer molino presenta una velocidad de rotación de 705 rpm mientras que los restantes de 590 rpm; el primero tiene función desfibradora dado el rayado especial de sus mazas. Presentan tolva tipo *Donelly* están accionados por motores eléctricos de rotor bobinado (un motor por unidad de molida). La presión de trabajo del primer y último molino es de 20,68 MPa (3 000 lbf/pulg²) mientras que los intermedios operan a 19,31 MPa (2 800 lbf/pulg²).

El último molino entrega el bagazo a un conductor de banda que lo eleva al rastrillo repartidor de los generadores de vapor. 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 (jugo primario) que pasa directamente al colador de jugo, mientras que el bagazo que resulta, se envía por los restantes molinos para continuar la extracción de sacarosa.

Para una mayor recuperación de esta, se aplica imbibición compuesta triple con el condensado de los calentadores de jugo en forma de aspersores. De esta manera, se obtiene a la salida del segundo molino el jugo diluido, el que se une con el jugo primario en las canaletas de los molinos para constituir el jugo mezclado.

Todo el bagazo obtenido se separa del bagacillo y pasa hacia los generadores de vapor correspondientes. Tanto el área de báscula y preparación como propiamente la de extracción se encuentran parcialmente automatizadas.

2.2 Selección de los parámetros para el control estadístico del proceso

Los parámetros para el control del proceso fueron seleccionados de AZCUBA (2013); el cual es el manual de operaciones vigente para todos los centrales azucareros del país. Este presenta los parámetros 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 interpretación por los técnicos de la industria.

Para el control del proceso en las dos áreas de estudio se definen cuatro tipos de variables. Estas definiciones fueron elaboradas por la autora y su extrapolación a otros estudios debe ser sometida a análisis. Dicha clasificación es la que se ofrece:

1. Variables establecidas o no establecidas
2. Variables simples o calculadas

Variables establecidas: son aquellas que permiten analizar el proceso y tomar decisiones durante el proceso productivo. Además, permiten evaluarlo en cuanto a eficiencia y pérdidas que se producen. Son las que se utilizan normalmente por la industria para el control del proceso.

Variables no establecidas: son aquellas que no se miden o registran como regla durante el proceso productivo, pero para el estudio en cuestión se hacen

necesarias para el análisis y para la determinación de las variables calculadas. Su determinación corre a cargo de la autora de este trabajo.

Variables simples: se definen como aquellas de fácil medición, las cuales permiten realizar análisis rápidos durante el proceso productivo y poder corregir de la misma forma cualquier problema que implique a otras variables de mayor complejidad. Pueden ser o no variables establecidas.

Variables calculadas: son aquellas que para determinarlas se hace necesario hacer balances de masa o energía.

A continuación, se presenta en una tabla la distribución de las variables de acuerdo a cada una de las definiciones anteriores:

Tabla 2.1: Listado de variables seleccionadas para el estudio del área de extracción.

Parámetro	Nomenclatura	Unidad de medida	Clasificación
Flujo de caña molida	CM	kg/h	Simple y establecida
Composición de fibra en caña molida	fCM	%	Simple y establecida
Composición de materia extraña	ME	%	Simple y establecida
Composición de Pol en caña molida	polCM	%	Simple y establecida
Composición de Pol del residuo leñoso	polRL	%	Simple y establecida
Contenido de sólidos disueltos del residuo leñoso	BxRL	°Bx	Simple y establecida
Humedad del bagazo	HmdRL	%	Simple y establecida
Composición de fibra en residuo leñoso	fRL	%	Simple y establecida

Flujo de agua de imbibición	AI	m ³ /h	Simple y establecida
Temperatura del agua de imbibición	Temp	°C	Simple y establecida
Presión del último molino	PMol	kgf/cm ²	Simple y establecida
Contenido de sólidos disueltos del jugo mezclado	BxJM	°Bx	Simple y establecida
Composición de Pol del jugo mezclado	polJM	%	Simple y establecida
Flujo de residuo leñoso	RL	kg/h	Calculada y establecida
Flujo de jugo mezclado	JM	kg/h	Calculada y establecida
Pérdidas en el residuo leñoso	perdRL	%	Calculada y establecida
Porcentaje de extracción del jugo mezclado	eJM	%	Calculada y establecida

2.2.1 Obtención de la información experimental

El muestreo de las variables en el CAI México se realiza durante diez días consecutivos del mes de marzo de la zafra 2020-2021 entre los períodos de limpieza; plazo de tiempo que es representativo del proceso. Para ello se realizan cuatro observaciones diarias de las variables operacionales objeto de interés.

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

La determinación del porcentaje de sólidos disueltos se determina según el procedimiento analítico número ocho de MINAZ (2006). Se emplea un refractómetro digital PDR-35 (China).

Para la determinación del porcentaje de fibra en caña se utiliza una prensa hidráulica Engehidro (Modelo PHE-45) a través del procedimiento analítico número dos de MINAZ (2006). La determinación de humedad en el residuo leñoso se realiza de acuerdo al procedimiento analítico número doce de MINAZ (2006).

El flujo de agua de imbibición se determina mediante lectura directa a través del flujómetro KF700 (China) instalado en el área y la temperatura de la misma se realiza mediante una pistola termométrica infrarroja (Testo830T4, Alemania).

El porcentaje de materia extraña se obtiene del reporte del laboratorio de calidad de la caña. La composición de pol en caña y el flujo de caña molida se obtienen a través del reporte de la contabilidad azucarera.

La composición de fibra en el bagazo se determina a partir de la expresión siguiente:

$$f_{RL} = 100 - Hmd_{RL} - Bx_{RL} \quad (2.1)$$

El flujo del jugo mezclado se calcula mediante un balance de masa general y uno por composición de fibra, tal que:

$$JM = CM + AI - RL \quad (2.2)$$

A su vez, el flujo de bagazo se determina como:

$$RL = \frac{f_{CM} \cdot CM}{f_{RL}} \quad (2.3)$$

Las pérdidas de sacarosa en el bagazo se determinan como:

$$perd_{RL} = \frac{pol_{RL} \cdot RL}{pol_{CM} \cdot CM} \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

Mientras que el porcentaje de extracción de jugo mezclado se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$eJM = \frac{JM}{CM} \cdot 100 \% \quad (2.5)$$

2.3 Análisis del comportamiento operacional de la etapa de extracción

El análisis del comportamiento operacional de la etapa de extracción se realiza sobre la base del procesamiento estadístico de la información de proceso recopilada. Para ello se emplea el software STATGRAPHICS (versión 16.2).

➤ Caracterización estadística básica

Primeramente, se realiza una caracterización estadística básica a cada conjunto de observaciones en la que se analiza para cada variable la media aritmética, el coeficiente de variación, los valores extremos entre otros indicadores. Ello permite realizar evaluaciones preliminares del proceso como la determinación de la dispersión de la información experimental y el análisis de la representatividad de la media muestral.

A través de diagramas bivariantes se analiza la posible relación entre diferentes variables operacionales. Entre las variables que se analizan se encuentra la dosificación del agua de imbibición según la caña molida, el peso de la fibra en caña y las pérdidas de sacarosa en el residuo leñoso.

➤ Análisis de la distribución de las observaciones

Como punto de partida para otras técnicas de análisis, se analiza el posible cumplimiento de las observaciones con la distribución normal. Para ello se emplea la prueba de Shapiro-Wilk (Kim, Kim, & Ahn, 2020), el criterio de los coeficientes de Kurtosis y asimetría, así como la distribución de las observaciones en un histograma de frecuencias (Cruz, Mamani, Romero, & Pineda, 2021).

Si la curva de distribución de densidad se asemeja a la campana gaussiana de distribución normal se puede corroborar por este criterio la normalidad de las observaciones.

Los histogramas ofrecen una forma diferente de organizar y mostrar los datos; son flexibles al seleccionar las clases y se pueden aplicar a los datos bivariados. Esta flexibilidad los hace adecuados como estimadores de la distribución subyacente de la población (Selvamuthu & Das, 2018); son además útiles para estimar la capacidad del proceso (Montgomery, 2013).

➤ Pruebas de hipótesis

Se realizan pruebas de hipótesis para analizar el cumplimiento de las variables con la norma operacional correspondiente, definidas por el departamento técnico del "CAI: México". La siguiente tabla muestra los requisitos que se tienen en cuenta.

Tabla 2.2: Requisitos operacionales de la etapa de extracción

Variable operacional	Requisito
Molienda horaria	No menor que 158 333,33 kg/h (3 800 000 kg/día)
Composición de materia extraña	No mayor que 9%
Presión del último molino	3100 psi (21,37 MPa)*
Temperatura del agua de imbibición	Valor máximo: 80 °C
Contenido de sólidos disueltos del jugo mezclado	Entre 14 y 15 °Bx
Humedad del bagazo	Valor máximo: 50%
Composición de Pol del bagazo	Menor que 1,90%
Composición de Pol en caña molida	Mayor que 11%

* Se emplea en el presente trabajo las unidades con que se maneja habitualmente esta variable en el proceso con el objetivo de favorecer la comprensión de los análisis correspondientes.

De forma tal que quedan formuladas de la forma siguiente:

- Para la molienda horaria (kg/h)

$H_0: \mu \geq 158\,333,33$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu < 158\,333,33$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para composición de materia extraña (%)

$H_0: \mu \leq 9$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu > 9$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para presión del último molino (kgf/cm²)

$H_0: \mu = 3\,100$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu \neq 3\,100$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para temperatura del agua de imbibición (°C)

$H_0: \mu \leq 80$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu > 80$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para brix del jugo mezclado (°Bx)

En este caso se emplea la combinación de dos pruebas de hipótesis para su implementación en el *software* STATGRAPHICS Centurion XVI (versión 16.2.04), dado la existencia de un intervalo en las especificaciones.

$H_0: \mu \leq 15$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu > 15$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

Y:

$H_0: \mu \geq 14$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu < 14$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para humedad del bagazo (%)

$H_0: \mu \leq 50$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu > 50$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para composición de pol en bagazo (%)

$H_0: \mu \leq 1,90$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu > 1,90$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

- Para pol en caña molida (%)

$H_0: \mu \geq 11$ (Hipótesis nula; cumplimiento con la norma)

$H_1: \mu < 11$ (Hipótesis alternativa; incumplimiento con la norma)

Este análisis está sujeto a errores tanto de tipo I, que no es más que el rechazo de la hipótesis nula cuando la información es cierta, como de tipo II que consiste en no rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es falsa (Selvamuthu & Das, 2018).

➤ Cartas de control

Se emplean cartas de control para analizar la variabilidad de los parámetros operacionales y establecer si se encuentran en control estadístico. Se utilizan las cartas de control tanto de media como de rangos (Selvamuthu & Das, 2018).

Se analizan las variables sujetas a normas operacionales mostradas en la tabla anterior, las que se asocian en subgrupos de acuerdo al día de las observaciones.

Por lo general, existe una razón por la que aparece un patrón no aleatorio en particular en un gráfico de control y, si se puede encontrar y eliminar, se puede mejorar el rendimiento del proceso (Montgomery, 2013).

Para establecer si el proceso se encuentra fuera de control se siguen las reglas establecidas por Western Electric Handbook (1956) que son recomendadas por su efectividad en Montgomery y Runger (2018).

➤ Capacidad del proceso

En caso de que las variables muestren un comportamiento en control estadístico se determina la razón de la capacidad del proceso (PCR, siglas en inglés de *Process Capability Ratio*) para evaluar la capacidad que tiene el proceso de extracción de cumplir con las especificaciones operacionales establecidos (límites predefinidos) (Selvamuthu & Das, 2018). Si el proceso no es centrado se emplea como indicador el CP_k , que se calcula respecto al límite de especificación más cercano a la media del proceso (Montgomery, 2013). Se establece como límites admisibles las normas operacionales especificadas en la tabla 2.2.

Se considera como valor aceptable mínimo para la capacidad del proceso si la variable se encuentra especificada con dos límites a 1,33 y de modo contrario, si está especificada por un límite a 1,25; de acuerdo a lo recomendado para procesos existentes por Montgomery (2013).

➤ Diagramas causa-efecto.

El formato de diagrama de causa y efecto proporciona una herramienta de organización eficaz y fácil de hacer (Vardeman & Jobe, 2016). Se realizan diferentes diagramas de causa-efecto para asignar y analizar las posibles causas de problemas o malas prácticas operacionales que sean arrojados por el análisis estadístico del proceso.

Para su realización se sigue la metodología propuesta por Gupta (2021), el que recomienda partir de la siguiente estructura básica:

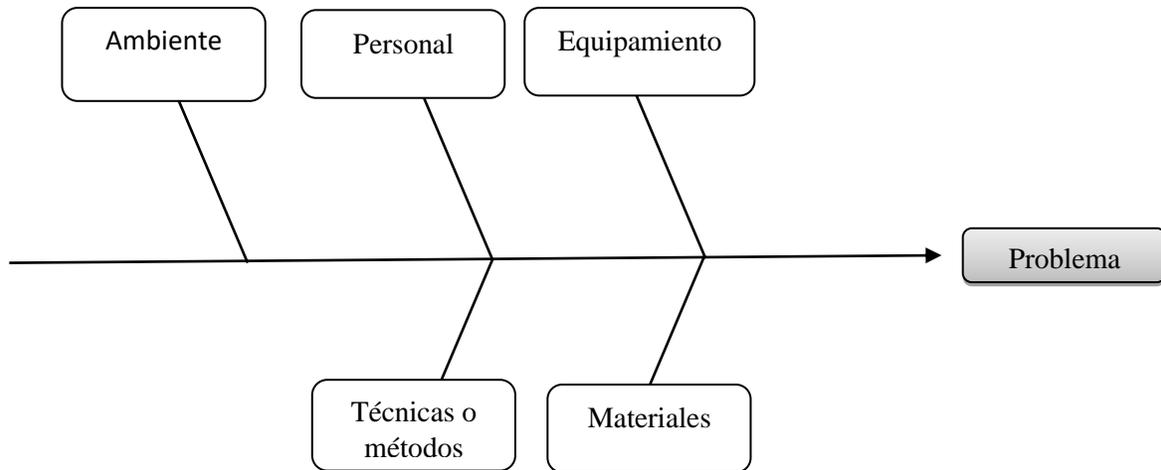


Figura 2.1: Estructura inicial del diagrama causa-efecto (Fuente: Gupta (2021))

A estos agentes causales se les asignan otras causas o problemas más específicos como elementos secundarios. La estructura básica anterior puede estar sujeta a modificaciones a medida que se desarrolle el análisis.

Capítulo 3: Análisis de los resultados

En este capítulo se exponen los resultados de la presente investigación. Se compone de dos partes fundamentales: la primera concierne al procesamiento estadístico de la información experimental del proceso recopilada y la segunda; a la aplicación de las técnicas de control estadístico para la evaluación y mejora de la etapa de extracción.

3.1 Caracterización estadística básica y análisis del proceso preliminar a partir de la información experimental

Se realizaron 40 observaciones distribuidas en un período de 10 días a través del procedimiento experimental descrito en el subepígrafe 2.2.1, cuyos resultados se muestran en el anexo 1. En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización estadística básica de las principales variables del área de extracción del proceso:

Tabla 3.1: Resultados estadísticos para las principales variables del proceso de extracción

Variables	Media	Valor Mínimo	Valor máximo	CV (%)
Composición de materia extraña (%)	10,69	6,23	15,58	23,09
Flujo de caña molida (10^3 kg/h)	138,35	94,69	166,02	13,31
Composición de fibra en caña molida (%)	17,14	15,60	18,60	4,02
Composición de pol en caña molida (%)	12,32	11,08	13,27	5,03
Flujo de agua de imbibición (m^3/h)	49,67	40,80	55,20	7,48
Temperatura del agua de imbibición ($^{\circ}C$)	57,78	35,00	82,00	22,75
Cantidad de agua de imbibición respecto al peso de la fibra en caña [kg/kg]	2,14	1,54	3,15	17,35

Brix del Jugo Primario (°Bx)	20,37	17,60	23,50	7,80
Brix del Jugo Mezclado (°Bx)	14,89	11,50	16,70	8,21
Presión de los molinos (psi)	3090,00	2900,00	3100,00	1,23
Composición de Pol del jugo primario (%)	17,25	14,83	20,82	9,10
Composición de Pol del jugo mezclado (%)	13,07	9,85	16,33	12,15
Composición de Pol del residuo leñoso (%)	2,10	1,46	3,09	17,34
Brix del residuo leñoso (°Bx)	4,34	2,30	7,20	23,86
Humedad del residuo leñoso (%)	50,32	48,30	52,50	1,90
Composición de fibra del residuo leñoso (%)	45,34	42,79	47,60	2,78
Pérdidas en bagazo (%)	6,51	4,20	10,07	20,71
Extracción de jugo mezclado (%)	98,58	87,34	116,58	7,10

El coeficiente de variación de la caña molida es relativamente superior a 12% lo que indica que existe dispersión de las observaciones de esta variable, acotadas en un intervalo de 94 690 - 193 500 kg/h. En la figura siguiente se muestra el diagrama de caja y bigotes correspondiente:

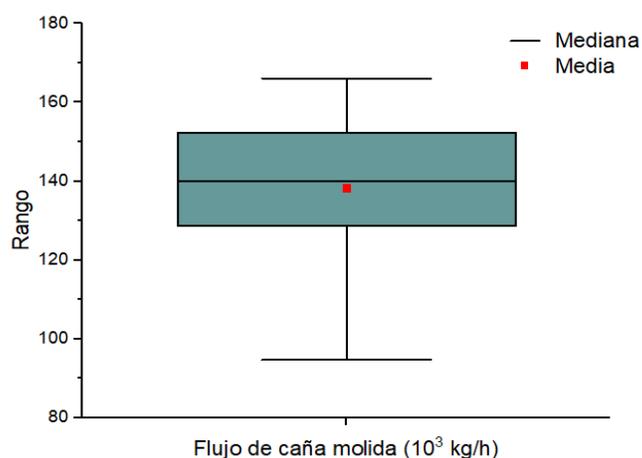


Figura 3.1: Diagrama de cajas y bigotes para el flujo de caña molida.

La muestra se encuentra bastante centrada (prácticamente coincide la mediana con la media) y se infiere por el gráfico que su variabilidad viene dada principalmente por bajos ritmos de molienda que por altos ya que el primer “bigote” es mucho más grande. De un 25 - 75% de las observaciones están comprendidas entre 130 000 - 150 000 kg/h (caja).

Un valor alto de coeficiente de variación indica inestabilidad en la molienda. Ello implica en primer lugar el reajuste consecuente del agua de imbibición y supone diferentes valores de flujo de bagazo y jugo mezclado; lo que hace que se “propague” por todo el proceso esa interferencia.

Un flujo variable de bagazo ocasiona que no siempre se mantenga el mismo nivel de generación de vapor y por consiguiente puede comprometer el balance energético del proceso. De igual modo, valores muy variables de jugo, además de requerir el reajuste del uso del vapor en las unidades de calentamiento y de lechada de cal, hace que no se mantenga constante la alimentación del jugo alcalizado en el clarificador. En los clarificadores, sobre todo los de bajo tiempo de retención (BTR) es indispensable que la alimentación sea lo más uniformemente posible para evitar revolturas y déficit de sedimentación.

Por otro lado, valores excesivamente altos de molienda, como es el caso del valor máximo de 166 020 kg/h que supera a la molienda nominal hace que no se disponga de la capacidad de molinos suficiente y del ajuste necesario en estos para alcanzar valores adecuados de eficiencia en la molienda; de igual modo, compromete a las estaciones de fabricación. Contrariamente, valores inferiores a lo normado atentan en contra del índice de extracción (menor presión efectiva en los molinos) de la economía del proceso y al autoabastecimiento energético del mismo.

Esta inestabilidad en la molienda detectada se atribuye a la falta de combustible para el corte y traslado de la caña que se evidenció en el período observado. También

se detectó una deficiente sincronización de la escasa maquinaria disponible para el suministro de la caña.

La materia extraña presenta una alarmante variabilidad, con valores muy superiores a lo normado. Igual de preocupante es la manera en que se distribuye esta variable a lo largo del intervalo observado, cuyo comportamiento se muestra en la figura siguiente:

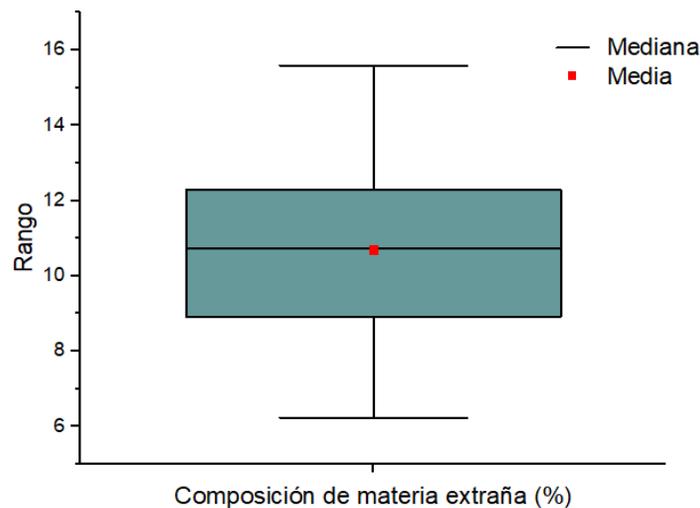


Figura 3.2: Diagrama de cajas y bigotes para la composición de materia extraña

A partir del diagrama anterior se infiere que existe una distribución bastante uniforme a lo largo del dominio de las observaciones respecto a esta variable. Implica entonces que el coeficiente de variación elevado que presenta no se debe a valores puntales atípicos o a una distorsión de una porción de las observaciones sino a toda la muestra en su conjunto; por lo que se infiere que estos valores de materia extraña variables fueron persistentes a lo largo de la experimentación. A su vez a partir del rango de la caja y del bigote superior se anticipa un evidente incumplimiento con la norma operacional.

La contaminación del colchón de bagazo con otras partes vegetales conlleva a elevados valores de humedad y de sacarosa en el residuo leñoso. Ocasiona

también la incorporación de no azúcares al proceso que incrementan el consumo de vapor de las masas cocidas y un mal agotamiento de las mieles.

La temperatura del agua de imbibición presenta una elevada dispersión con valores muy distantes que denotan falta de control tecnológico sobre esta variable; tal dispersión se aprecia en la figura siguiente:

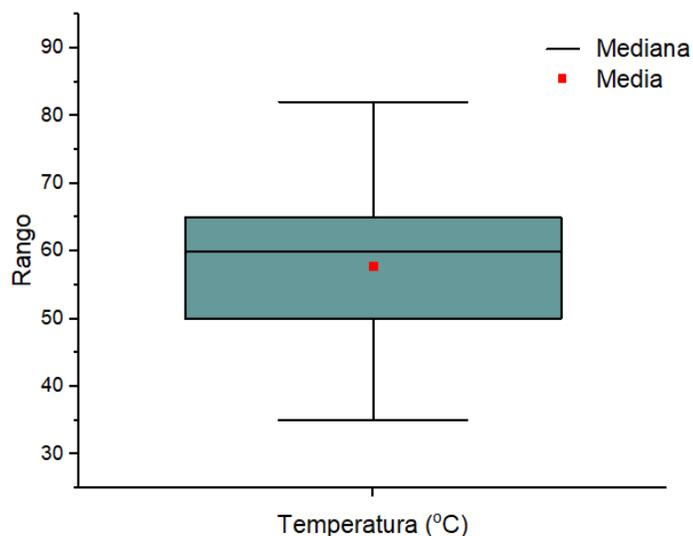


Figura 3.3: Diagrama de caja y bigotes para la temperatura del agua de imbibición

Tal comportamiento se debe a la ausencia de una instrumentación en el área que permita el monitoreo sistemático y constante de la misma.

La fibra en caña molida y el brix, y la pol del jugo primario presentan poca variabilidad lo que se atribuye a que durante ese período se mantuvo el mismo campo de corte y, por consiguiente, se operó con las mismas variedades botánicas en igual estadio de vida. La fibra en caña molida presenta valores favorables que garantizan (siempre que la molida se mantenga al ritmo normado) suficiente disponibilidad de bagazo para la generación.

A pesar de existir una elevada variación en el flujo de caña, el flujo de agua de imbibición es poco variable lo que anticipa que este no se reajustó consecuentemente según la caña o la cantidad de fibra molida y que se incurrió en

indisciplina tecnológica en este sentido. En la siguiente figura se muestra el comportamiento del agua de imbibición según la caña molida y el flujo por componente de fibra de la misma:

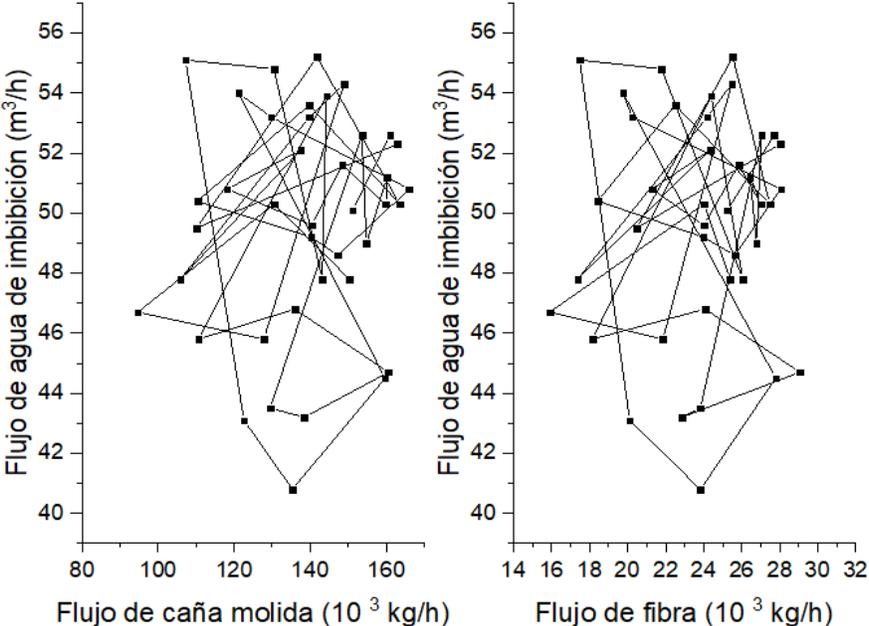


Figura 3.4: Gráficos de flujo de agua de imbibición con respecto al flujo de caña molida y la fibra.

Tal comportamiento también se mantiene en el valor de la relación del agua de imbibición según el peso de la fibra en caña molida, que se describe en la figura siguiente:

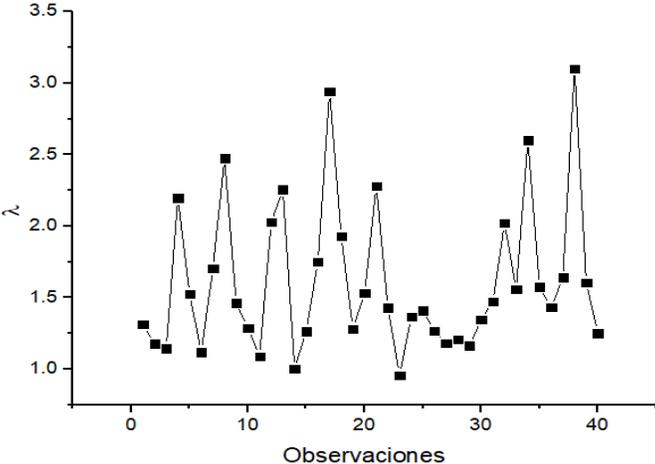


Figura 3.5: Agua de imbibición según el peso de la fibra en caña.

Esta variable es de suma importancia en la etapa e influye en todos sus parámetros de calidad.

El comportamiento descrito en la figura 3.5 con relación al agua de imbibición es la principal causa entonces a la elevada variabilidad y comportamiento inadecuado del brix y pol del jugo mezclado y de iguales parámetros en la corriente de bagazo. En la siguiente figura se muestra la elevada correspondencia de la pol en bagazo y, por consiguiente, de las pérdidas de sacarosa en la etapa con respecto a esta variable:

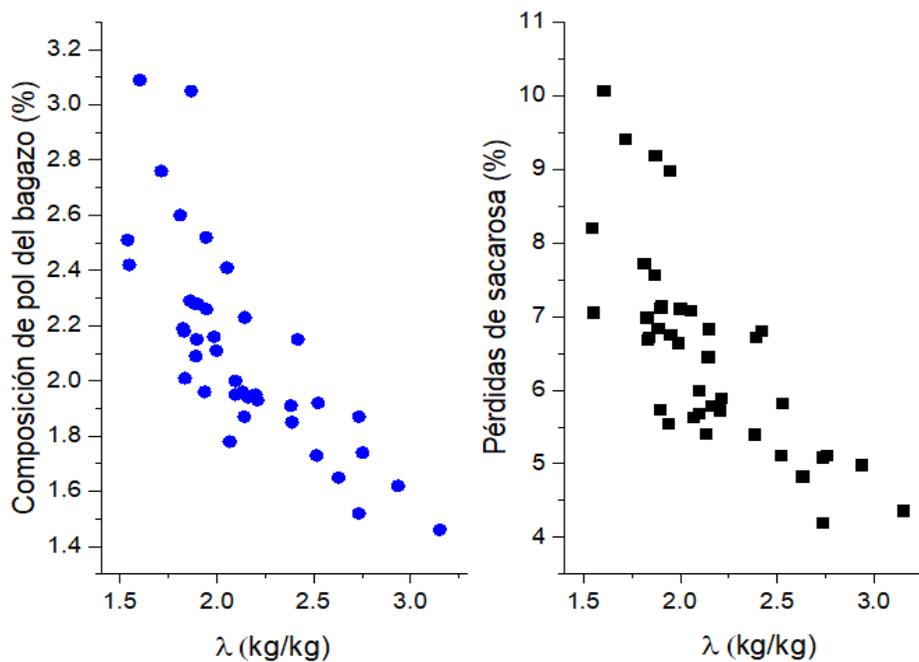


Figura 3.6: Composición de pol del bagazo y pérdidas de sacarosa según la relación de imbibición.

De esta manera también se prueba que aún es posible la mejora de la eficiencia de la etapa a partir de una correcta dosificación del agua de imbibición y que al menos una parte de las pérdidas incurridas eran fácilmente mitigables.

La presión del último molino se encuentra poco dispersa y a pesar de presentar al menos un valor inferior al establecido, permite inferir que prácticamente se mantuvo estable sobre 3 100 psi (valor normado). Este es uno de los parámetros operacionales del área más importantes, ya que condiciona en gran medida la extracción de jugo y la humedad del bagazo. De hecho, la humedad del bagazo mantiene un comportamiento poco variable con tendencia a valores un tanto superiores al 50% (norma operacional). Los valores superiores a la misma se atribuyen a inadecuados valores de presión en el último molino tal como lo demuestra la figura siguiente:

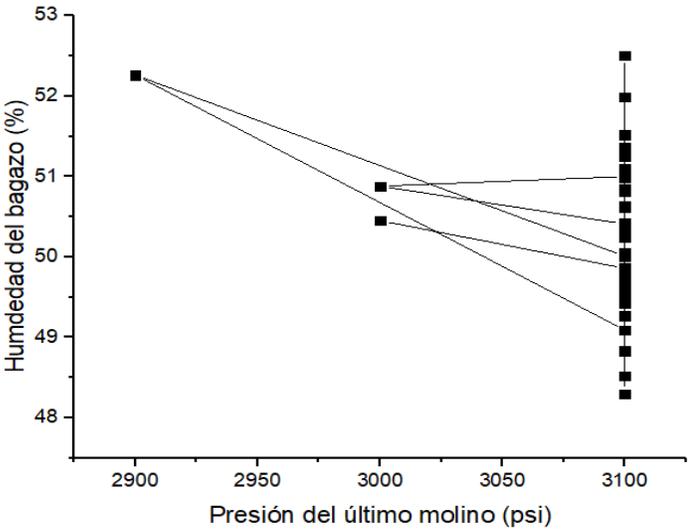


Figura 3.7: Gráfico de la humedad del bagazo según la presión del último molino.

De la caracterización estadística también resaltan valores superiores de extracción del jugo mezclado atribuidos a excesivos valores de agua de imbibición. Ello es preocupante ya que una desfavorable dilución del jugo no solo implica un mayor consumo de vapor en el área de fabricación, sino que compromete la capacidad de evaporación y en última instancia conlleva a interrumpir la molienda hasta tanto no se “liquide” el exceso de agua. Además, conlleva a una incorporación inadecuada de no azúcares al proceso. En la figura siguiente se describe este comportamiento:

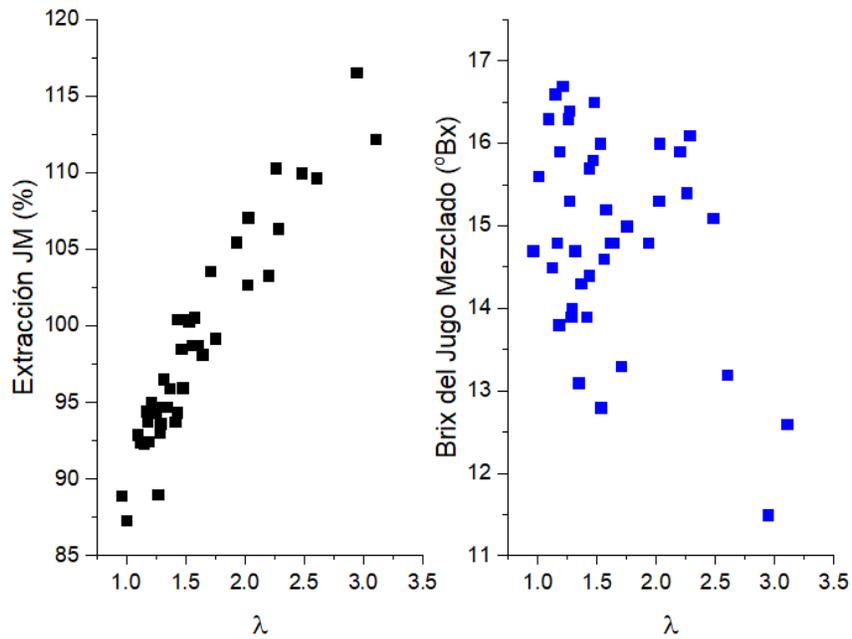


Figura 3.8: Relación de la extracción y brix de jugo mezclado según la cantidad de agua de imbibición

Se aprecia como los mayores valores de extracción de jugo mezclado tienen asociados valores bajos de composición de sólidos solubles en el jugo.

3.2 Pruebas de normalidad de las observaciones

Se analiza el posible ajuste a la distribución normal de las observaciones de las variables operacionales que se someten a técnicas estadísticas que requieren de tal cumplimiento.

Para ello se tienen como criterio fundamental a la prueba de Shapiro-Wilk de normalidad, la que es más recomendable que la de Kolmogorov-Smirnov cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 (Mishra et al., 2019). En la tabla siguiente se muestran los resultados para cada variable de interés:

Tabla 3.2: Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk para una confianza del 95%

Variables	P-valor
Materia extraña	0,43

Caña molida	0,10
Pol en caña molida	0,11
Temperatura del Al	0,08
Brix del Jugo Mezclado	0,14
Presión de los molinos	0,00
Pol del residuo leñoso	0,10
Humedad del residuo leñoso	0,96

En todos los casos a excepción de la presión del último molino, se presenta un valor de probabilidad mayor que 0,05 para una confianza del 95%; por lo que se puede inferir por este sentido que los datos presentan una distribución normal (Martínez, Sánchez, Toledo, & Faulin, 2020; Valentini, dos Santos, & Muller Vieira, 2021).

Esta inferencia se corrobora mediante los coeficientes de Kurtosis y asimetría, tal como se muestra en la tabla 3.3

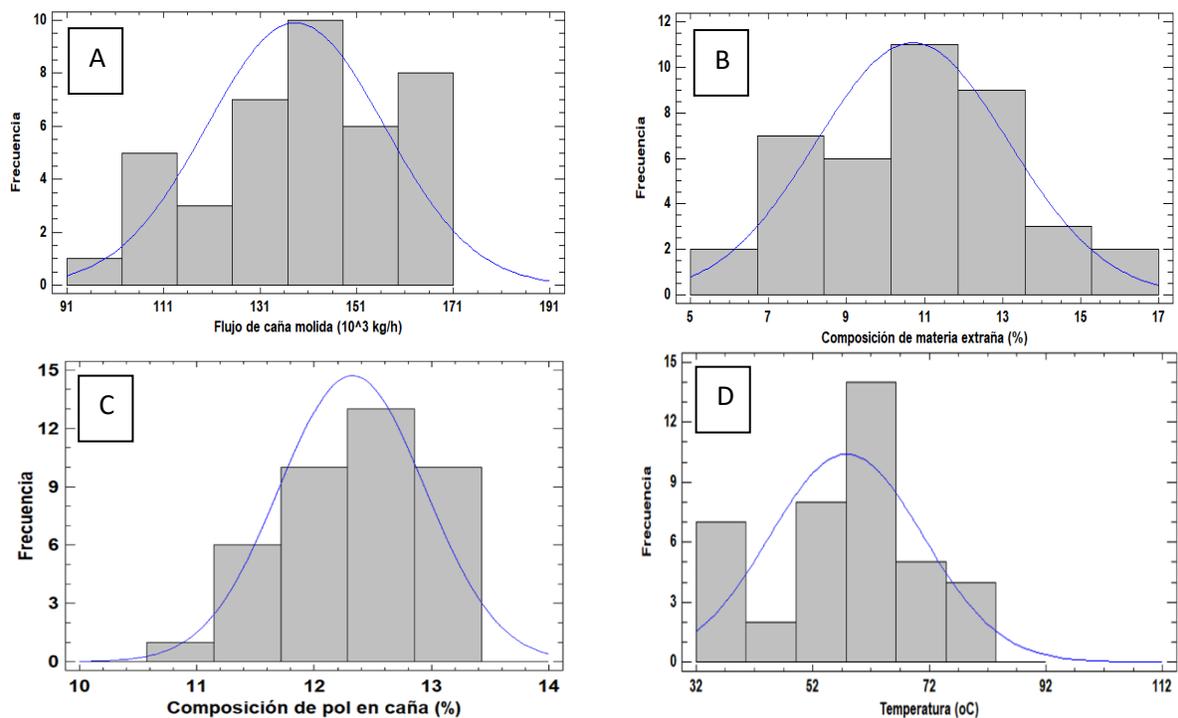
Tabla 3.3: Coeficientes de Kurtosis y asimetría.

Variab les	Kurtosis	Asimetría
Materia extraña	-0,85	0,16
Caña molida	-0,64	-1,27
Pol en caña molida	-1,15	-0,67
Temperatura del Al	-1,05	-0,50
Brix del Jugo Mezclado	0,22	-1,77
Presión de los molinos	22,68	-10,61
Pol del residuo leñoso	1,19	2,10
Humedad del residuo leñoso	-0,07	0,39

Se infiere que las variables que presentan valores acotados entre -2 y 2 (la mayoría) presentan una distribución normal (Sejati, Kasmiasi, & Ikhsan, 2019).

La pol en el residuo leñoso difere levemente del límite superior, no obstante ello no compromete el resultado mediante esta prueba ya que este intervalo no es absoluto; de hecho hay autores que referencian criterios un tanto más abarcadores como 3 (Martínez et al., 2020). Con relación a la presión del último molino se verifican valores muy alejados de estos límites lo que reafirma la inferencia de una distribución anormal para este valor.

De igual manera se analiza la distribución de las mismas a través de histogramas de frecuencias, que se agrupan en la figura siguiente:



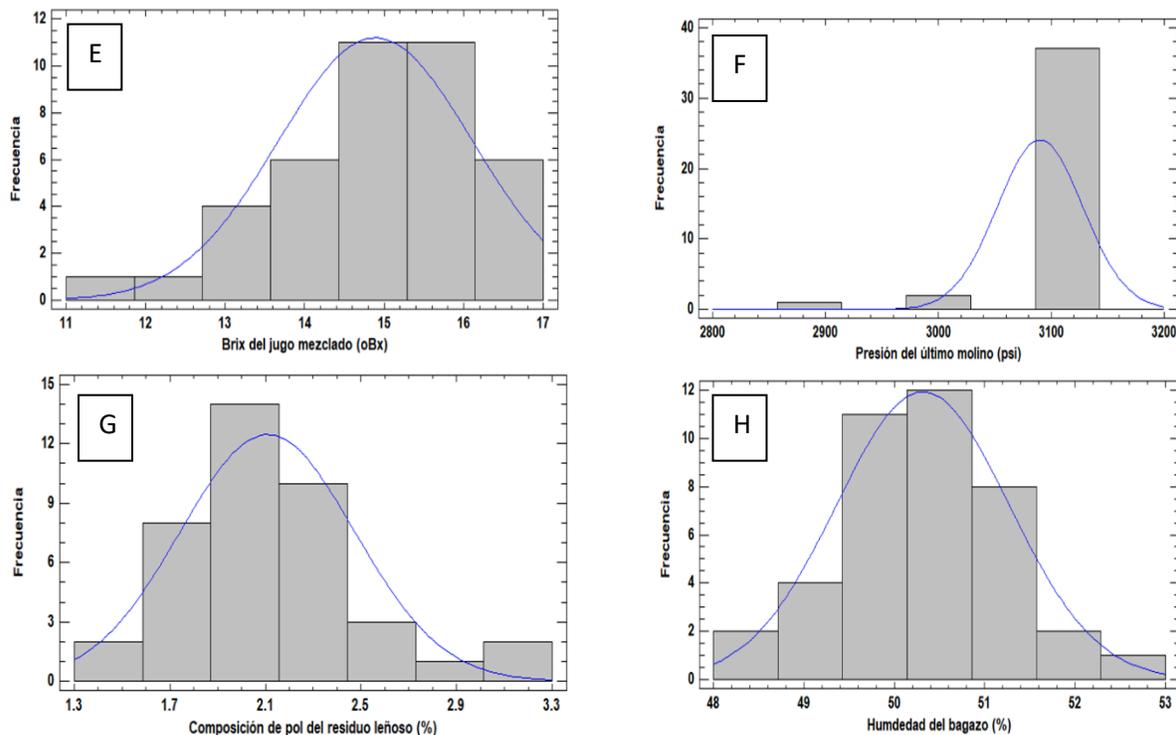


Figura 3.9: Histogramas de frecuencias para: A-Flujo de caña molida; B- Composición de materia extraña; C-Composición de pol en caña; D- Temperatura del agua de imbibición; E-Brix del jugo mezclado; F-Presión del último molino; G-Composición de pol en bagazo y H-humedad del bagazo.

Cada histograma se construye con siete clases de acuerdo a las recomendaciones de Guerra y Sevilla (1986) según el tamaño de la muestra. Se aprecia a partir de los mismos que la curva de distribución de densidad que describen tiene cierta similitud a la campana gaussiana de distribución normal; a excepción del caso F (presión del último molino).

Para la presión del último molino se aplica en primera instancia lo establecido por la NC92-21 (1980) para la exclusión de observaciones anormales. Resultan anormales todos los valores de presión diferentes a 3 100 psi; lo que hace que la muestra resultante no tenga variación y que, por lo tanto, siga con una distribución

poco ajustada a la normal. Ello imposibilita la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas para esta variable.

No obstante, si se analiza la muestra sin tales observaciones se infiere sin lugar a dudas que este parámetro cumple con el valor normado y que se encuentra adecuadamente controlado. En la práctica no necesariamente este valor de presión hidráulica permanece constante, puede estar sujeto al menos a una variabilidad natural pero muy pequeña que no es detectada por la instrumentación, de acuerdo a la sensibilidad del mismo.

Los análisis anteriores para todos los casos, excepto para la presión del último molino, denotan una distribución normal en sus observaciones. De esta manera se satisface el principal requisito para la aplicación de las pruebas de hipótesis y las cartas de control.

3.3 Pruebas de hipótesis

Se aplican pruebas de hipótesis para analizar el cumplimiento de las muestras con los principales valores normados del área de extracción. En la tabla siguiente se ofrecen los resultados de las pruebas de hipótesis para cada caso.

Tabla 3.4: Resultados de las pruebas de hipótesis en el área de extracción para un 95% de confianza.

Variable	Media	Norma	P-valor	Cumplimiento
Molienda horaria (kg/h)	138 350,00	No menor que 158 330 t/h	0,00	No cumple
Composición de materia extraña (%)	10,69	No mayor que 9%	0,00	No cumple
Temperatura del agua de imbibición (°C)	57,78	Valor máximo: 80 °C	1,00	Cumple
Brix del jugo mezclado (°Bx)	14,89	Entre 14 y 15 °Bx	1,00 (para el límite inferior) y	Cumple

			0,71 (para el límite superior)	
Humedad del bagazo (%)	50,32	Valor máximo: 50%	0,02	No cumple
Pol del bagazo (%)	2,00	Menor que 1,90%	0,00	No cumple
Pol en caña molida (%)	12,32	Mayor que 11%	1,00	Cumple

Se incumple con el valor mínimo normado de caña molida cuyas causas se presentan en el epígrafe 3.1. Ello compromete seriamente la eficiencia económica del proceso y conlleva a que sea más difícil alcanzar el punto de equilibrio para obtener ganancias. Afecta el compromiso productivo de la entidad y desaprovecha su capacidad de molienda. De igual modo, supone mayor dificultad para alcanzar la molienda crítica, a partir de la cual el proceso se puede autoabastecer energéticamente por el uso del bagazo generado como combustible. Estos elementos adquieren una connotación mayor en un contexto operacional en el que se evidencia ineficiencias en la extracción de sacarosa y excesivas diluciones del jugo mezclado.

Se incumple con el valor normado para la composición de materia extraña, la humedad del bagazo y su composición de pol ya que el valor de probabilidad de la prueba es menor que 0,05 para una confianza del 95%; lo que conlleva al rechazo de la hipótesis nula (formulada en base al cumplimiento de la norma). Este comportamiento está en correspondencia con las inferencias preliminares realizadas en la caracterización estadística básica del epígrafe 3.1.

El incumplimiento con la composición de materia extraña en la caña molida ocasiona graves consecuencias para el proceso. A través de su molienda se incorporan no azúcares como el almidón que ocasiona aumento de la viscosidad, dificulta procesos de filtración, decantación, evaporación y cristalización (San

Martín, 2020). Al respecto, Rein (2012) plantea que entre un 30 - 40% del almidón que no se separa en la etapa de purificación se incrusta en el cristal de azúcar crudo. Hoy una de las principales limitaciones comerciales del azúcar crudo cubano es el alto contenido de este compuesto.

Además cuando existen elevados contenidos de meollo y otros materiales, se tiene un bagazo de características extractivas y porosidad inadecuadas que provoca una alta retención de jugo; lo que hace que se incumpla con el contenido de humedad y de pol en el residuo leñoso, así como una de la capacidad de operación (Pérez & Benítez, 2012).

El incumplimiento con la norma operacional de humedad del bagazo ocasiona serias consecuencias en el área de generación de vapor y por lo tanto en la disponibilidad de esta utilidad. Ello provoca que disminuya su valor calórico inferior (Ginste & Partanen, 2020); de hecho en Lodos y Casanova (2019) se presenta una tabla donde se nota el incremento de la masa necesaria de bagazo para alcanzar la misma energía en su combustión a medida que aumenta este valor. Mientras más húmedo se encuentre el bagazo, más energía se debe destinar para alcanzar el punto de ignición del mismo y más bajo es entonces, el índice de generación de vapor.

Además del efecto de la presión del último molino sobre la humedad del bagazo descrito en el epígrafe 3.1 no se puede dejar de considerar el de la temperatura del agua de imbibición, que presentó valores muy inferiores. Tal como lo plantea Kent (2011) hay pocas dudas de que el bagazo es más compresible a temperaturas más altas. Experimentos demuestran que el contenido de humedad del bagazo es menor a una temperatura más alta, de 1 - 2 unidades a medida que la temperatura del agua agregada aumenta de 60 - 90 ° C.

3.4 Gráficos de control de las principales variables operacionales del proceso

Se analiza el comportamiento de las principales variables del área de extracción según los días muestreados en gráficos de control para analizar la variabilidad de los parámetros operacionales y definir si se encuentran o no en control estadístico.

Para su análisis se siguen como criterios para establecer que está fuera de control estadístico de acuerdo a Montgomery y Runger (2018):

1. Existencia de al menos un punto fuera de la zona de 3-sigma
2. Dos puntos de tres consecutivos en la frontera del límite 2-sigma (en la misma región)
3. Cuatro de cinco puntos consecutivos a una distancia de 1 sigma o en la frontera de la línea central (en la misma región).
4. Ocho puntos consecutivos a un lado de la línea central.

Las figuras 3.10 y 3.11 corresponden a las cartas de control para la media y el rango del flujo de caña molida diario respectivamente:

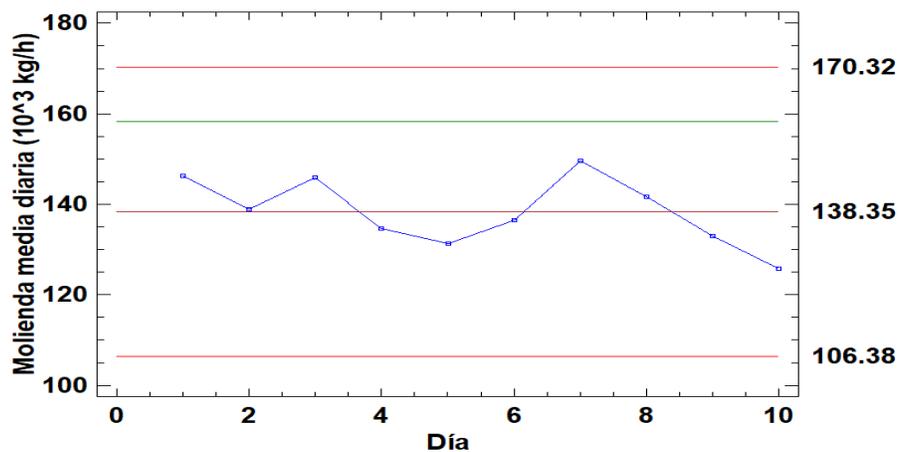


Figura 3.10: Carta de control para media de la molienda diaria

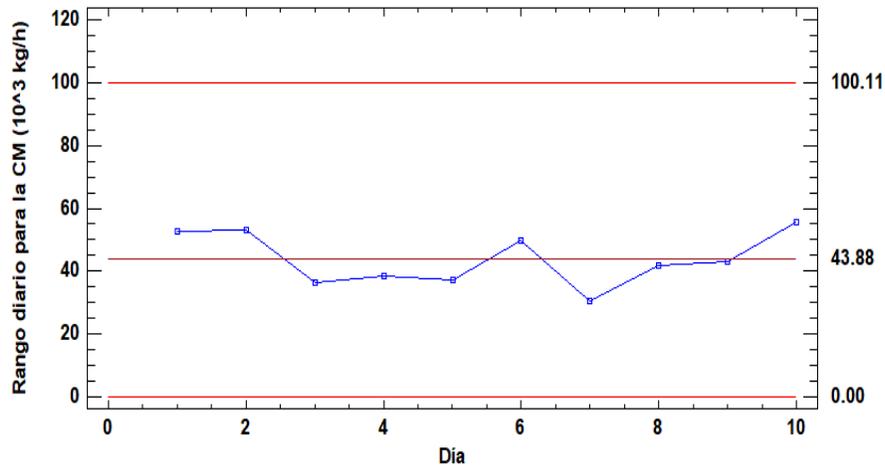


Figura 3.11: Carta de control para el rango de la molienda diaria

Se aprecia que la media del flujo de caña molida se encuentra bajo control estadístico de acuerdo a las reglas anteriormente presentadas, pero no en calidad, ya que todos los promedios diarios están por debajo del valor mínimo normado (línea verde). Su comportamiento a partir del séptimo día fue poco armonioso y oscilante a lo largo de la línea central, lo que se debe a los problemas presentados al respecto en el epígrafe 3.1.

Como el rango es pequeño denota que tal comportamiento de la media del séptimo día en adelante no se debe a ninguna desviación puntual en las observaciones del día, sino que fue sostenido, al menos, en todos los momentos muestreados. Tal tendencia representa un peligro potencial que puede anticipar de no controlarse, un proceso fuera de control en un futuro inmediato.

En las siguientes figuras se ofrecen las cartas de control de media y rango diario para la composición de materia extraña:

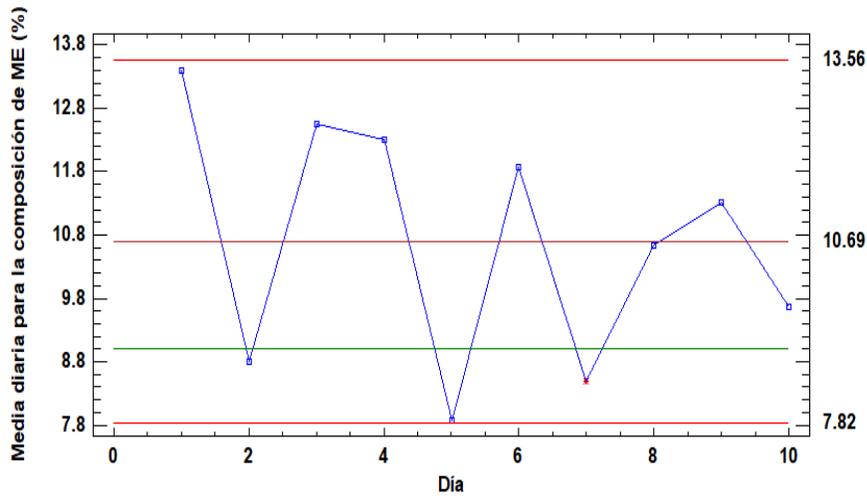


Figura 3.12: Carta de control para media de la composición de materia extraña

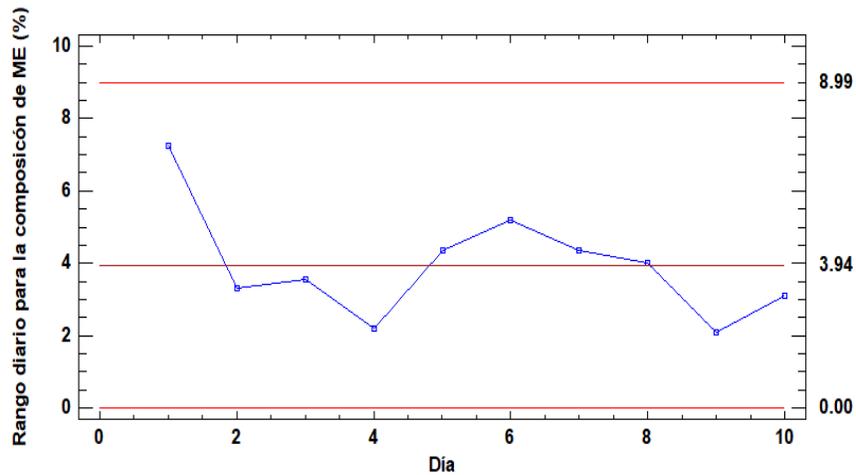


Figura 3.13: Carta de control para el rango de la composición de materia extraña

Se considera que la composición de materia extraña se encuentra fuera de control estadístico ya que presenta un punto (quinto día) justamente en la frontera del límite inferior de la zona 3-sigma aunque no la sobrepasa. Realmente las reglas presentadas por Montgomery y Runger (2018) son relativas y solo son recomendaciones que deben considerarse cuando se analiza un caso particular.

Preocupante también es el comportamiento del primer día, en el que la media observada se encuentra en la vecindad del límite superior; específicamente esta representa el mayor valor de materia extraña lo que tiene una incidencia negativa

para el proceso. El rango del primer día denota la existencia de valores muy distantes entre sí lo que denota aún más la variabilidad descontrolada de este día. Se infiere que a partir del sexto día el proceso comienza con una adecuada tendencia oscilante y armoniosa con tendencia a su regulación sin que ello implique el cumplimiento con la norma operacional (línea verde en el gráfico). Solamente cumplen con dichas normas los días 2,5 y 7.

En las siguientes figuras se muestran los gráficos de control para la pol del residuo leñoso:

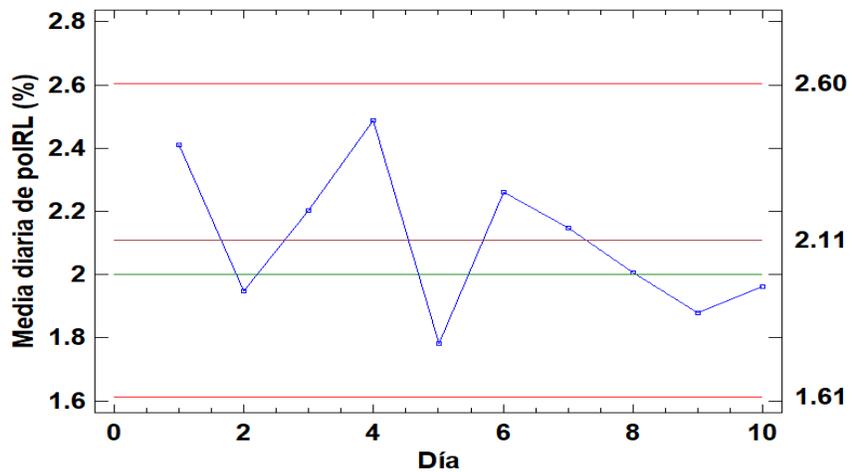


Figura 3.14: Carta de control para la media de la pol en el residuo leñoso.

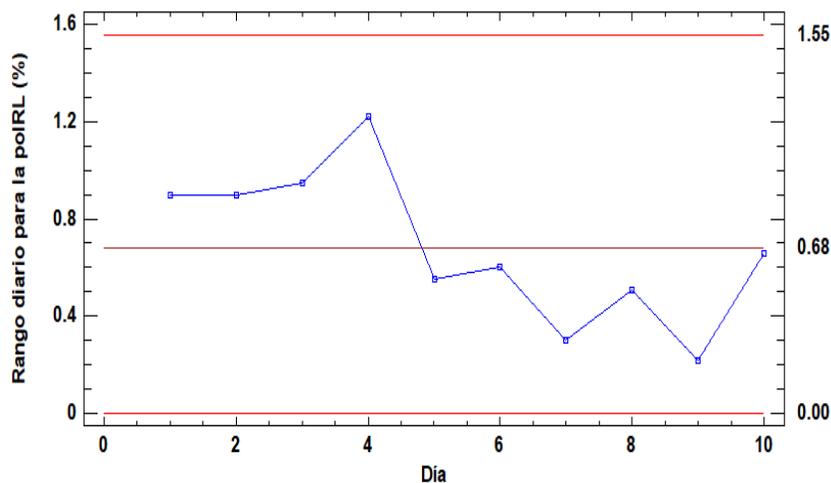


Figura 3.15: Carta de control para el rango de la pol en el residuo leñoso.

Se considera que la pol en bagazo no se encuentra en control estadístico, dada la tendencia completamente al decremento evidenciada a partir del sexto día en el caso de la media y el comportamiento atípico del rango a partir del quinto día. Solamente cumplen con lo normado (línea verde en el gráfico) los días 2, 5 y 7.

La pol en caña molida, el brix del jugo mezclado, la temperatura del agua de imbibición y la humedad del bagazo se encuentran bajo control estadístico, cuyos gráficos aparecen reflejados en el anexo 2.

El promedio diario de pol en caña molida y de la temperatura del agua de imbibición de todas las observaciones cumple con la norma operacional por lo que además están en calidad. Sin embargo, para la humedad del bagazo y el brix del jugo mezclado existe un comportamiento que denota un incumplimiento sistemático y no controlado con las especificaciones operacionales (líneas verdes en los gráficos). Ello representa un imperativo para la toma de decisiones operacionales que permitan revertir tal situación ya que es muy probable que, de no solucionarse, se mantenga esta violación en el tiempo. Tal como se ha planteado con anterioridad entre las principales causas se encuentra el no reajustar consecuentemente el agua de imbibición ante cambios e inestabilidades de la molida.

Valores superiores e inferiores a lo normado del brix del jugo mezclado supone un sobreconsumo de vapor y disminuye la capacidad del proceso mientras que valores muy superiores retardan significativamente la velocidad de sedimentación en la clarificación. Este último efecto es causante de revolturas en el clarificador y poca compactación de lodos (dificulta la compresibilidad de la torta en la filtración); es de gran incidencia entonces para un proceso de purificación que es continuo con un clarificador de bajo tiempo de retención.

3.5 Índices de capacidad de proceso

Se realiza la determinación de la capacidad del proceso para ver si el proceso es capaz de verificar los valores de las variables operacionales (que denotaron

control estadístico) que cumplan con las especificaciones tecnológicas normadas; o sea, establecer su potencial.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de este análisis para la caña molida:

Tabla 3.5: Resultados del análisis de capacidad para el flujo de caña molida

Parámetro	Valor
Norma operacional	Mayor que 158 330,00 kg/h
Porcentaje de incapacidad	86,10%
Capacidad real (C_{pk})	-0,37

En este caso se analiza como parámetro el índice de capacidad real porque el proceso no es centrado; tal como se aprecia en la figura siguiente en donde la línea roja representa a la norma operacional:

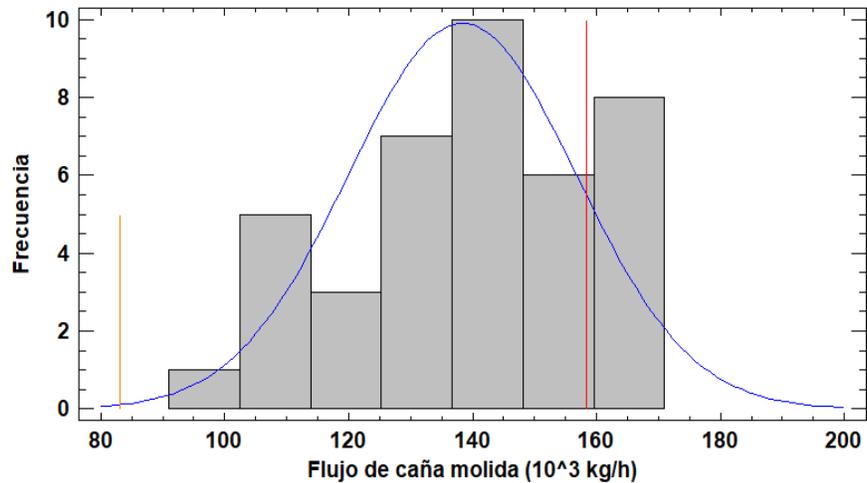


Figura 3.16: Gráfico de capacidad para esta variable

A partir de estos resultados se infiere que el proceso con este ritmo de molienda es incapaz de satisfacer lo normado, ya que el índice de capacidad real es inferior a 1 (Montgomery & Runger, 2018). De hecho, incumplen el 86,10% de las observaciones, que de no corregirse los problemas asociados y dado que

presenta esta variable una distribución normal puede esperarse igual comportamiento en la población. Debe garantizarse un mejor aseguramiento logístico en el combustible para garantizar un adecuado suministro de caña que permita lograr que el proceso sea capaz con un índice de al menos 1,25; ya que se encuentra acotado por un límite de calidad (Montgomery, 2013).

Los resultados de esta prueba aplicados a la composición de pol en caña molida se muestran en la tabla y figura siguientes:

Tabla 3.6: Resultados del análisis de capacidad para la pol en caña molida

Parámetro	Valor
Norma operacional	Mayor que 11,00%
Porcentaje de incapacidad	1,64%
Capacidad real (C_{pk})	0,86

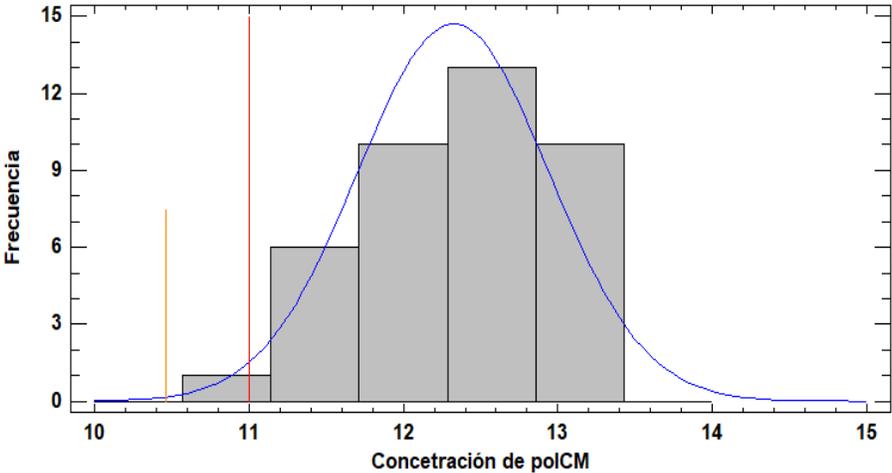


Figura 3.17: Gráfico de capacidad para esta variable

El proceso es incapaz en este sentido, es decir, de mantenerse igual comportamiento puede para un 95% de confianza verificarse en la práctica el incumplimiento con las especificaciones de pol en caña. Para su mejora se deben perfeccionar los mecanismos de control en los campos de cultivos para garantizar la molida de una caña con mayor madurez y concentración de sacarosa.

Los resultados del análisis de capacidad para la temperatura del agua de imbibición se muestran en la tabla y figura siguientes:

Tabla 3.7: Resultados del análisis de capacidad para la temperatura del agua de imbibición

Parámetro	Valor
Norma operacional	Menor que 80 °C
Porcentaje de incapacidad	4,54%
Capacidad real (C_{pk})	0,68

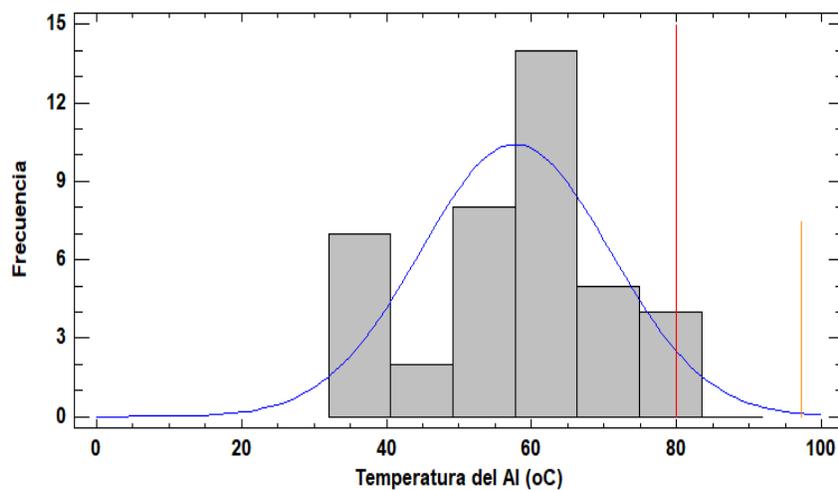


Figura 3.18: Gráfico de capacidad para esta variable

Tal como sucede con el caso anterior el proceso es incapaz en este sentido. Por ello para mejorar el mismo se debe en primer lugar colocar un instrumento de medición en el área que permita monitorear sistemáticamente esta variable y regular su valor mediante el sistema de atemperamiento existente.

Los resultados del análisis de capacidad para el brix del jugo mezclado se muestran en la tabla y figura siguientes:

Tabla 3.8: Resultados del análisis de capacidad para el brix del jugo mezclado

Parámetro	Valor
Norma operacional	Entre 14 - 15 °Bx
Porcentaje de incapacidad	69,75%
Capacidad real (C _{pk})	0,14

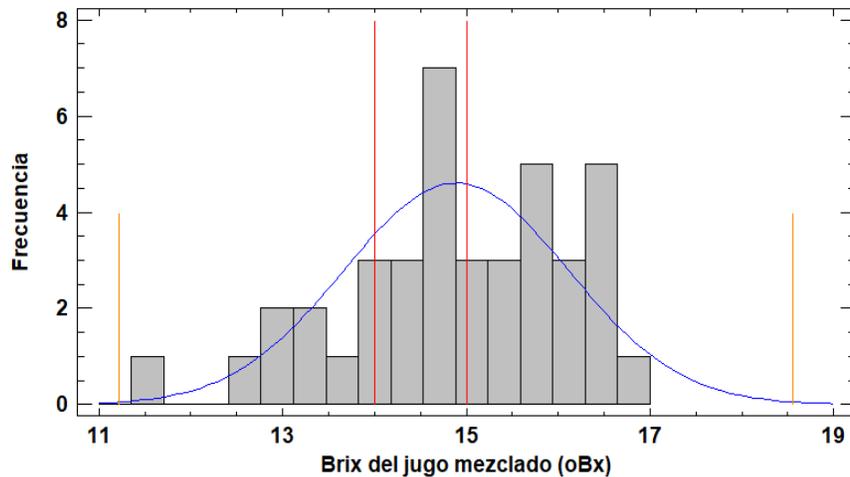


Figura 3.19: Gráfico de capacidad para esta variable

El proceso es incapaz, para las condiciones de imbibición aplicadas, de garantizar un adecuado comportamiento del brix del jugo mezclado. Preocupantemente se tiene que, cerca de un 70% de los valores de brix del jugo mezclado pueden fácilmente estar fuera de norma. Se debe aplicar adecuadamente la dosificación del agua de imbibición para garantizar una dilución adecuada del jugo primario hasta garantizar un índice de capacidad de 1,33 ya que se encuentra especificado por dos límites de calidad (Montgomery, 2013).

Los resultados del análisis de capacidad para la pol del residuo leñoso se muestran en la tabla y figura siguientes:

Tabla 3.9: Resultados del análisis de capacidad para la composición de pol en el residuo leñoso.

Parámetro	Valor
Norma operacional	Menor que 2%
Porcentaje de incapacidad	61,69%
Capacidad real (C _p _k)	-0,12

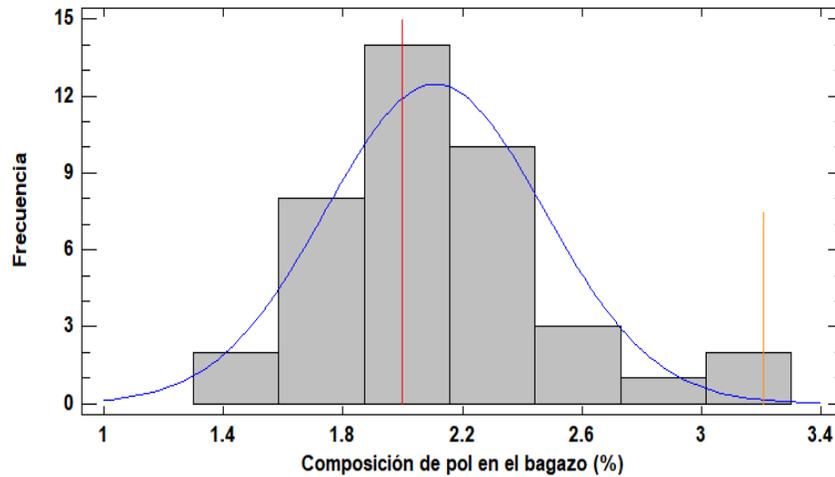


Figura 3.20: Gráfico de capacidad para esta variable

El proceso es muy incapaz de garantizar un adecuado cumplimiento con el valor normado, denotado por el bajo valor de índice de capacidad real; a tal punto que de cada cien observaciones que se pudiesen realizar al proceso, cerca de un 60% resultarían fuera de norma. Para mejorar este comportamiento en primer lugar debe garantizarse un correcto ajuste del agua de imbibición, acción operacional que no requiere de ningún recurso material sino de disciplina tecnológica en este sentido.

Los resultados del análisis de capacidad para la humedad del bagazo se muestran en la tabla y figura siguientes:

Tabla 3.10: Resultados del análisis de capacidad para la humedad del bagazo.

Parámetro	Valor
Norma operacional	Menor que 50%

Porcentaje de incapacidad	62,93%
Capacidad real (Cp _k)	-0,11

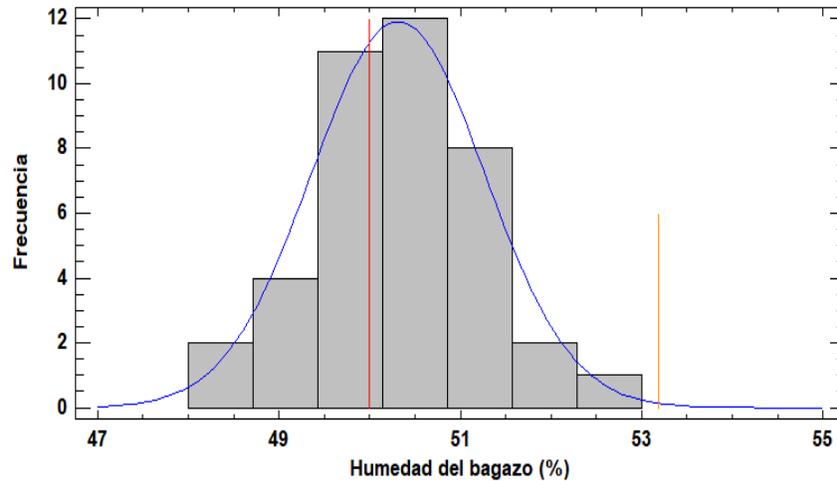


Figura 3.21: Gráfico de capacidad para esta variable

El proceso es incapaz de cumplir de forma adecuada con las especificaciones de humedad del bagazo, representado por un desfavorable valor de índice de capacidad real. Al igual que sucede con la composición de pol en bagazo, tiene una ineficacia de más de un 60% en este sentido. Tal comportamiento se atribuye principalmente a una inadecuada operación de la imbibición y a un elevado procesamiento de materia extraña.

3.6 Asignación de las causas a los principales problemas tecnológicos detectados

Se realizan diferentes diagramas causa-efecto que permiten establecer de manera concluyente y concisa los principales problemas operacionales detectados en la etapa con sus causas atribuibles, muchas de ellas demostradas a lo largo de este capítulo.

- Inestable suministro de caña (inestabilidad en la molida)

Las principales causas de este problema se representan en el esquema siguiente:

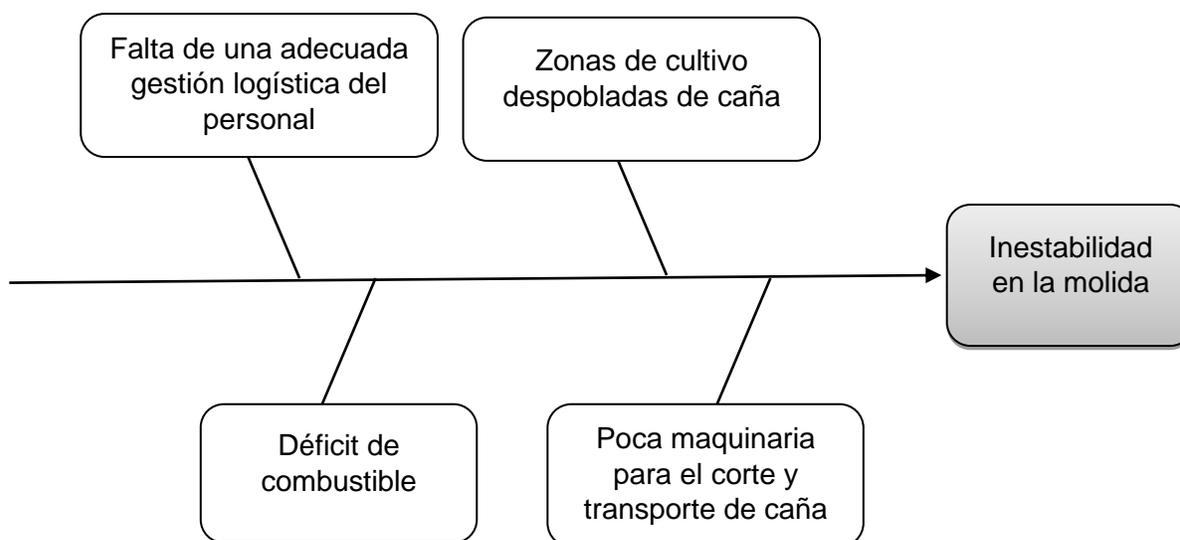


Figura 3.22: Diagrama espina de pescado para las principales causas de inestabilidad en la molienda

Con relación a estas causas se tiene que:

- El déficit de combustible se debe al recrudecimiento del bloqueo económico del gobierno de los Estados Unidos hacia Cuba; enmarcado en un contexto de crisis económica mundial a raíz de la pandemia de la Covid-19 que imposibilitó un adecuado aseguramiento del mismo. A ello se le añade la poca disponibilidad de divisas para su adquisición en un mercado internacional reducido.
- Se atribuye una adecuada gestión logística del mismo ya que se debe operar cuando exista cierta reserva de combustible para así evitar inestabilidades en la molienda o hasta inclusive, paradas por más de cinco horas que suponen ineficiencias y sobreconsumo energético. También deben valorarse otros proveedores, concentrar mejor los recursos y otras formas de pago con relación al combustible. Al respecto también se tiene el retraso en el cumplimiento del pago a los productores, lo que conlleva a distorsiones en las cadenas de suministro de caña.
- La poca maquinaria para el corte y traslado de la caña se debe a la ausencia de piezas de repuesto, a sobreexplotación de los recursos y/o

vencimiento del tiempo de vida útil de los mismos sin propiciar una nueva adquisición. Ello en conjunto con los grandes problemas anteriores tiene un efecto sinérgico muy influyente y negativo.

- La ausencia de caña en algunos campos de cultivos se debe a la poca disponibilidad de insumos y maquinaria agrícola, agudizado por el actual contexto económico y por falta de gestión empresarial. Incide también la ineficiencia del monitoreo en la etapa de siembra y el abandono de los campos, privado de un seguimiento durante el tiempo previo a la cosecha de la caña. Esto implica entonces una menor disponibilidad de la materia prima.
- Incumplimiento de la norma de humedad del bagazo, pol en bagazo y brix del jugo mezclado

Las principales causas de este problema se representan en el esquema siguiente:

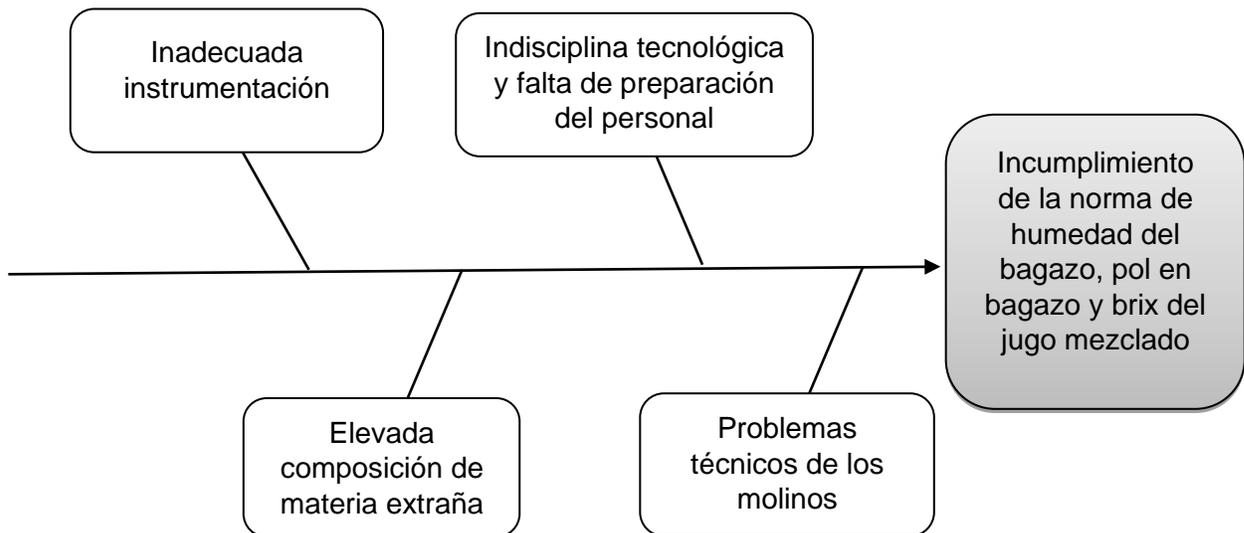


Figura 3.23: Diagrama espina de pescado para las principales causas de incumplimiento de la norma de humedad del bagazo, pol en bagazo y brix del jugo mezclado.

Con relación a estas causas se tiene que:

- La ausencia de un termómetro que permita controlar la temperatura del agua de imbibición conlleva a resultados desfavorables de estas variables operacionales dada la marcada influencia de este parámetro sobre ellas.
- A su vez, la indisciplina tecnológica juega un papel muy significativo ya que no se reajusta consecuentemente el agua de imbibición según varíe el peso de la fibra en la caña; lo que tiene un mayor efecto en condiciones de molienda inestable. Relacionado con ello se tiene a la falta de capacitación del personal, dado que en muchos casos la incorrecta operación del tándem no solo se debe a negligencia o indiferencia del personal, sino al desconocimiento de los protocolos tecnológicos y a los principios básicos que rigen la etapa.
- La elevada composición de materia extraña provoca resbalamiento de los molinos debido al elevado contenido de hojas y disminuye la extracción de azúcar debido a las pérdidas de sacarosa por un incremento en los volúmenes de bagazo. Además, hace que el bagazo que resulta de cada compresión retenga elevada humedad y que no se realice el proceso de lixiviación de la imbibición de forma adecuada, lo que a su vez propicia una mala extracción.
- Problemas técnicos en molinos, que se expresa en algunas observaciones en bajos valores de presión hidráulica, no permiten alcanzar la condición de fibra límite y que, por lo tanto, se tenga un mayor jugo ocluido en la estructura fibrosa del bagazo con mayor riqueza. A su vez, se evidencia el deficiente agarre de las mazas y tupición en aspersores de la imbibición debido a un mantenimiento deficiente; cuyas causas son la escasez de recursos e indisciplina tecnológica.

3.7 Propuesta de un plan de medidas que permitan una mejora del comportamiento de la etapa de extracción

Las causas que originan los distintos problemas, resultan la base para lograr un plan de acciones adecuado al proceso. Según los resultados obtenidos se deben

tomar un conjunto de medidas que aporten soluciones reales y garanticen el comportamiento esperado en la etapa de extracción de azúcar.

Medidas en el ámbito técnico:

- No operar el tándem a una capacidad superior a la concebida en su ajuste (en inglés: “*setting*”).
- Instalar un termómetro de campo que permita conocer la temperatura del agua de imbibición.
- Establecer un sistema de atemperamiento del agua de imbibición que permita ajustar la temperatura de la misma. Este debe estar acoplado a un sistema de control automático que favorezca su mantenimiento a 60 °C.
- Garantizar mediante una efectiva política de mantenimiento un adecuado estado de los aspersores del agua de imbibición.
- Engrasar periódicamente el sistema mecánico de las masas de los molinos.
- Reemplazar los manómetros defectuosos del área de molinos y acoplarlos a un sistema de control automático con alarma.
- Mejorar el agarre y rugosidad de las mazas de los molinos y reemplazar aquellas que se encuentren en muy mal estado técnico.
- Perfeccionar el sistema de control de la operación tecnológica del departamento técnico, de forma tal que se detecte a tiempo y oportunamente una incorrecta operación de la imbibición.
- Aumentar la eficiencia y capacidad de las estaciones de limpieza.
- Determinar periódicamente el índice de preparación de la desfibradora mediante la técnica 1 de MINAZ (2006). En caso de presentar valores desfavorables, reajustar los parámetros del equipo o planificar un plan de mantenimiento para su inmediata implementación en el período de limpieza. Relacionado con la preparación de la caña también se encuentra garantizar un adecuado rayado de las masas del primer molino.

Medidas en el ámbito logístico:

- Desarrollar una adecuada gestión logística del personal que garantice el correcto abastecimiento y aprovechamiento de los recursos, que se ajuste a las necesidades del proceso y de los productores.
- Evitar a medida de lo posible el retraso en las negociaciones para hacer frente al déficit de combustible.
- Realizar e implementar estudios de cadena de suministros y de optimización de rutas que permitan un uso más eficiente del combustible asignado para el corte y traslado de la caña.
- Perfeccionar a medida de las posibilidades el estado técnico de la maquinaria agrícola y de corte que permita disminuir el índice de consumo de combustible.
- La existencia de zonas de cultivo despobladas de caña disminuye el potencial de producción; para contrarrestar esta situación se deben buscar alternativas para el desarrollo de fertilizantes y plaguicidas a través de nuevos proyectos innovadores e inversiones extranjeras. A su vez, se debe fomentar el desarrollo de estaciones de control biológico de la caña de azúcar y la siembra por parte de los productores, de cepas más resistentes.
- Cumplir en tiempo con el pago a productores y estimular monetariamente a aquellos que sobrecumplan lo pactado con la entidad.
- Negociar con los productores nuevas formas de pago que incentiven un control más estricto de la materia extraña.

Medidas en el ámbito de los recursos humanos:

- Capacitar a los operadores acerca de cómo se debe reajustar el agua de imbibición ante diferentes condiciones de molida.
- Aplicar correctamente mecanismos en el pago laboral que contemple el desempeño tecnológico de los operadores del área de molinos y que, por lo

tanto, permitan la bonificación o penalización de su actuar en el establecimiento de los parámetros operacionales de la imbibición.

- Motivar el trabajo del personal del laboratorio de control e incentivar seriedad y responsabilidad en el monitoreo de los parámetros de calidad del proceso.

Conclusiones parciales del capítulo:

1. Se evidencian variaciones significativas en el flujo de caña molida, lo que ocasiona inestabilidades en los parámetros operacionales del área y que se incumpla con la molida horaria normada.
2. No se reajusta el flujo de agua de imbibición según varíen las condiciones en la molida, lo que ocasiona incumplimientos con la composición de la pol en el residuo leñoso.
3. No se controla la temperatura del agua de imbibición dada la inexistencia de un termómetro en el área; una alta variabilidad denotado por un coeficiente de variación del 22,75%.
4. La composición de materia extraña presenta valores totalmente desfavorables, algunos del orden del 15% y no está en control estadístico, lo que causa ineficiencias en la extracción y excesiva humedad del bagazo.
5. El flujo de caña molida y su composición de pol, la temperatura del agua de imbibición, la pol y humedad en bagazo se encuentran en control estadístico sin embargo son incapaces de satisfacer lo normado; ninguna variable analizada presenta un índice de capacidad superior a uno.

Conclusiones

1. La etapa de extracción del CAI: "México" para el período de la zafra denota un comportamiento desfavorable, de acuerdo a los valores de sus principales variables operacionales; por lo que se corrobora la hipótesis supuesta.
2. Se incurren en grandes pérdidas de sacarosa por una dosificación ineficaz del agua de imbibición.
3. La indisciplina tecnológica, el incumplimiento con la calidad de la caña, una pobre instrumentación y el déficit en el suministro de caña son los principales problemas detectados en el área.
4. Se establecen en base a los problemas detectados un conjunto de medidas de ámbito técnico, logístico y de recursos humanos cuya correcta implementación permite su erradicación.

Recomendaciones

- Implementar de manera inmediata y eficaz el conjunto de medidas propuestas para la erradicación o mitigación de los problemas tecnológicos detectados en el área de extracción del CAI: “México”.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, A. A., Llanes, J. Á. V., Cortés, I. B., & Perdomo, C. R. (2019). DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN CALENTADORES DE JUGO DE CAÑA. *Revista Centro Azúcar*, 46(1), 9-9.
- Arca, M. P., Esparza, R., Arca, M. E., Escobar, R., Fundora, G. F., & Arca, C. A. (1988). *El Consultor: Una guía práctica para solucionar problemas en fábricas de azúcar de caña*. Miami (Florida), USA: ACRA Corporation.
- Assawamartbunlue, K., Kunrapeegayson, N., & Limwattana, P. (2018). Specific energy consumption of sugar cane mills in Thailand. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 625-630.
- AZCUBA. (2013). Planta moledora *El Consultor*. La Habana.
- Balla, W. H., Rabah, A. A., & Abdallah, B. K. (2018). Pinch Analysis of Sugarcane Refinery Water Integration. *Sugar Tech*, 20(2), 122-134. doi: 10.1007/s12355-017-0535-5
- Barreiro, J. B. (2011). *Operación de las áreas de manipulación de caña y planta moledora*. Cuba.
- Batule, E. (2009). La molienda y difusión de la caña de azúcar. In E. Batule (Ed.), *Serie azucarera 20*: . San Salvador (El Salvador).
- Bernardi, L. A. (2019). *Perfil del Azúcar*. Argentina: Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca.
- Birru, E. (2016). Sugar cane industry overview and energy efficiency considerations.
- Birru, E., Erlich, C., & Martin, A. (2019). Energy performance comparisons and enhancements in the sugar cane industry. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(2), 267-282. doi: 10.1007/s13399-018-0349-z
- Cabrera, A., de la Cruz, O., Gómez, B., & Rodríguez, R. (2015). Administration in the industrial proces of the cane sugar: experiences of the case of Cuban study that integrates statistical and exonomic methods. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 38(3).
- Cabrera, A., & Gómez, B. (2011). CONTROL DEL PROCESO DE MOLIENDA MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE BOX-JENKINS EN LA EMPRESA AZUCARERA "PAQUITO ROSALES", SU INFLUENCIA EN EL COSTO DE LA PRODUCCIÓN. *Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*(76).
- Carrazana, L. (1987). *Análisis Agro Industrial: Azucarero Teoría y Práctica* (Vol. La Habana (Cuba)): Editorial Pueblo y Educación.
- Casanova, E., Almazán, O., & Lodos, J. (2019). Capítulo 4: Tecnología Azucarera. En E. ICIDCA (Ed.), *Resultados de los Institutos Cubanos de Investigación, Desarrollo e Innovación en las Tecnologías sobre Azúcar y Derivados* (pp. 57-91). Ciudad de La Habana (Cuba).
- Casanova, E., & Alonso, J. (2006). *Métodos de cálculos para el control azucarero*. La Habana (Cuba): Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras.MINAZ.
- Corrales-Suárez, J. M., Gil-Ortiz, J. M., Remédios-Castañeiras, P. D., Masjuan-Leyva, Y., & Alexander Gil-Ceballos, J. (2015). Operación de los molinos del tándem cañero a dos niveles de presión hidráulica. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(1), 123-130. doi: [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72113-X](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72113-X)
- Cortés Falcón, M., Cornes Izquierdo, Y., Alomá Vicente, I., & González Suárez, E. (2019). EVALUACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO EN EL CENTRAL AZUCARERO QUINTÍN BANDERA. *Centro Azúcar*, 46(3), 66-78.
- Cortés, M. G., Vicente, I. A., Pedraja, R. E., & Suárez, E. G. (2015). TECNOLOGÍAS Y SISTEMAS PARA EL MANEJO DE AGUA Y CONDENSADOS EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR. *Revista Centro Azúcar*, 42(1).

- Cruz, J., Mamani, W., Romero, C., & Pineda, F. (2021). Selection of Characteristics by Hybrid Method: RFE, Ridge, Lasso, and Bayesian for the Power Forecast for a Photovoltaic System. *SN Computer Science*, 2(3), 202. doi: 10.1007/s42979-021-00584-x
- Chantasiriwan, S. (2016). Optimum imbibition for cogeneration in sugar factories. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1031-1038.
- Dogbe, E. S., Mandegari, M. A., & Görgens, J. F. (2018). Exergetic diagnosis and performance analysis of a typical sugar mill based on Aspen Plus® simulation of the process. *Energy*, 145, 614-625. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.134>
- Eggleston, G., Legendre, B., & Godshall, M. (2017). Sugar and Other Sweeteners (pp. 933-978).
- Flores, B., Espinoza, C., Gutiérrez, J., & Amado, J. (2017). Control estadístico de procesos para pérdidas de sacarosa en el bagazo y productividad en el área de trapiche - Empresa Agraria Azucarera Andahuasi S.A.A. *INGnosis*, 3(2).
- Gálves, L., & Otero, I. (2019). Capítulo 2: La disponibilidad de la materia prima caña y de sus coproductos. En E. ICIDCA (Ed.), *Resultados de los Institutos Cubanos de Investigación, Desarrollo e Innovación en las Tecnologías sobre Azúcar y Derivados* (pp. 23-35). Ciudad de La Habana (Cuba).
- Ginste, J., & Partanen, S. (2020). Feasibility analysis of upgrading the cogeneration unit of George Washington sugar mill in Cuba.
- González, F., Castellanos, J. A., & Puertas, J. F. (2010). Método para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en la industria de azúcar de caña. *Ingeniería Mecánica*, 13(1), 41-48.
- González, G., Alomá, I., Espinosa, R., & González, E. (2014). Tecnologías y sistemas para el manejo de agua y condensados en la producción de azúcar. *Centro Azúcar*, 42(1), 72-87.
- Guerra, J., & Sevilla, É. (1986). *Introducción al análisis estadístico para procesos* (Vol. Tomo II). La Habana: ISPJAE.
- Gupta, B. (2021). *Statistical Quality Control: Using Minitab, R, JMP, and Python*. Pondicherry (India): John Wiley & Sons,.
- Hernández Pedrera, C., & Da Silva Portofilipe, F. (2016). Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de su calidad. *Tecnología química*, 36(1), 104-116.
- Herrera, E., Zuazaga, J., & Díaz, A. (1996). *Planta Moledora: Operación en zafra*.
- Herrera, I., Rúa, C., & Lechón, Y. (2015). *Análisis de ciclo de vida del proceso de transformación de la caña de azúcar para la producción de bioetanol en la planta de bella unión de la empresa alcoholes del Uruguay (ALUR)*. Uruguay.
- Hoing, P. (1987). *Principios de Tecnología Azucarera: Propiedades de los azúcares y no-azúcares. La purificación de los jugos* (E. Revolucionaria Ed.). La Habana.
- Hugot, E. (2014). *Handbook of Cane Sugar Engineering*: Elsevier.
- ICIDCA. (2012). *Índice de Capacidades*. La Habana (Cuba): Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar.
- Jiménez, R., Monteagudo, J. P., & Lorenzo, J. (2017). Potencialidades de mejoras energéticas en el proceso tecnológico en los centrales azucareros. *Revista de Ingeniería Energética*, 38(2), 88-96.
- Junco, G. (2011). *Manual para la Autogestión de Aprendizaje por Competencias: Planta moledora*.
- Kent, G. J. S. t. (2011). The effect of added water temperature on milling train operation and performance. 13(1), 1-6.
- Kim, J.-M., Kim, T., & Ahn, S. (2020). Loss Assessment for Sustainable Industrial Infrastructure: Focusing on Bridge Construction and Financial Losses. *Sustainability*, 12(13), 5316.

- Kumar, S., Yadav, A., & Kumar, A. (2020). DESIGN MODIFICATION TO ENHANCE THE PERFORMANCE OF ROTARY DRUM VACUUM FILTER. En STAI (Ed.), *e-Proceedings of 78th Annual Convention of STAI* (pp. 124-132). Nueva Delhi (India): STAI.
- Lodos, J., & Casanova, E. (2019). Capítulo 9: Los biocombustibles cañeros. En E. ICIDCA (Ed.), *Resultados de los Institutos Cubanos de Investigación, Desarrollo e Innovación en las Tecnologías sobre Azúcar y Derivados* (pp. 213-245). Ciudad de La Habana (Cuba): ICIDCA.
- Lodos, J., Sabadí, R., & Rostgaard, L. (2019). Capítulo 11: La energía en el proceso azucarero. En E. ICIDCA (Ed.), *Resultados de los Institutos Cubanos de Investigación, Desarrollo e Innovación en las Tecnologías sobre Azúcar y Derivados* (pp. 260-294). La Habana (Cuba).
- Londhe, M., Kale, K., Dixit, K., & Raj, S. (2020). CASE STUDY - IMPACT OF HIGH IMBIBITION % CANE (50 % +) ON SUGAR RECOVERY AND STEAM CONSUMPTION. En STAI (Ed.), *e-Proceedings of 78th Annual Convention of STAI* (pp. 155-164). Nueva Delhi (India): STAI.
- Marín, F., Moreno, M., A, F., F, V., JM, R. B., & van den Berg, M. (2018). Modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización *EUR 29018 ES*. Luxemburgo.
- Martínez, M. Á., Sánchez, A., Toledo, A., & Faulin, J. (2020). *Bioestadística amigable*. España.
- Martínez, P., Leiva, J., Carta, A., & Bravo, L. (2019). *Control analítico y contabilidad azucarera*. Santa Clara: Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Meghana, M., & Shastri, Y. (2020). Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges. *Bioresource Technology*, 303, 122929. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122929>
- MINAZ. (2006). *Manual de métodos analíticos para azúcar crudo (MACU)*: Instituto cubano de investigaciones azucareras. División de aseguramiento y calidad.
- Mishra, P., Pandey, C., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*.
- Mkwananzi, T., Mandegari, M., & Görgens, J. F. (2019). Disturbance modelling through steady-state value deviations: The determination of suitable energy indicators and parameters for energy consumption monitoring in a typical sugar mill. *Energy*, 176, 211-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.191>
- Mohammed, Y. (2018). *Optimization of Steam Generation and Consumption: A Case study Elguneid Sugar Factory, Gezira State, Sudan*. (Master of Science), Universidad de Gezira, Sudán.
- Montgomery, D. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control* (7ma ed.): Wiley.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7ma ed.). Estados Unidos: Wiley.
- Mulet, M., & Fernández, R. E. (2016). Automation of Raw sugar Crystallizer Tacho of Central Julio Antonio Mella. *Tecnología Química*, 36(2).
- Navarro, H., & Rostgaard, L. (2014). Impacto de la materia extraña en la calidad de los jugos de caña y en los indicadores de eficiencia de un central azucarero. *Centro Azúcar*, 41(1), 44-54.
- NC92-21. (1980). Procedimiento para evaluar la anormalidad de los resultados de las observaciones NC92-21 (pp. 5). República de Cuba.
- Ordóñez, S. C. (2004). *Modelo de diagnóstico para la evaluación de la productividad de un proceso agroindustrial azucarero*. (Trabajo de graduación al conferírsele el título de Ingeniera Química), Universidad de San Carlos de Guatemala Guatemala.
- Perán, J. R. e. a. (2001). *Libro Blanco de la Automatización y Control en la Industria de la Caña de Azúcar*: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

- Pérez, C., & Benítez, J. (2012). Influencia de la calidad de la materia prima en el proceso tecnológico, calidad del producto final, y el rendimiento industrial en una fábrica de azúcar. *Revista Centro Azúcar*, 39(3).
- Pérez de Alejo, H., Perez, A., Corrales, Y., Pérez, O., Curbelo, T., González, Y., . . . Marrero, R. (2009). *El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos* (1 ed.). Ciudad de La Habana (Cuba): Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior.
- Pérez, H., Goza, O., Santana, R., & Pérez, O. (2005). *Notas sobre la producción de azúcar crudo*. La Habana (Cuba): ISPJAE.
- Pierdant Rodríguez, A. I., & Rodríguez Franco, J. (2009). Control estadístico de la calidad de un servicio mediante Gráficas< img src="..\..\..\..\img/revistas/polcul/n32/a9s1. jpg"> y R. *Política y cultura*(32), 151-169.
- Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*: Bartens.
- Rodríguez, L. E., & Batista, R. (2009). *Eliminación del consumo de agua cruda en el proceso de fabricación de azúcar crudo de caña*: Ciencias Holguín.
- Rodríguez, P. (1997). *Manual de cálculo rápido para la industria azucarera*. La Habana (Cuba): MINAZ.
- Rosales-Genet, Y., Clavelo-Sierra, D. A., Morales Zamora, M., & González Cortés, M. (2020). MODIFICACIONES EN EL ESQUEMA DE EVAPORACIÓN PARA REDUCIR LOS CONSUMOS DE AGUA Y ENERGÍA EN UN CENTRAL AZUCARERO. *Centro Azúcar*, 47(1), 43-52.
- Rosero, E., & Ramirez, J. (2009). Modelado y Control de Molinos de Caña de Azúcar usando Accionamientos Eléctrico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 6(3), 44-53.
- Rosero, E. E., Ramírez, J. M., & León, A. (2008). *Evaluación del desempeño dinámico y la eficiencia energética en molinos de caña de azúcar con accionamientos térmicos y eléctricos*. Colombia.
- Ruiz, A. (2006). *Control Estadístico de Procesos*. Madris.
- Safder, U., Ifaei, P., & Yoo, C. (2020). A novel approach for optimal energy recovery using pressure retarded osmosis technology: Chemical exergy pinch analysis – Case study in a sugar mill plant. *Energy Conversion and Management*, 213, 112810. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112810>
- Sahu, O. (2018). Assessment of sugarcane industry: Suitability for production, consumption, and utilization. *Annals of Agrarian Science*, 16(4), 389-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.08.001>
- San Martín, A. (2020). *Establecimiento de condiciones de imbibición para un mejor comportamiento de la etapa de extracción del proceso de producción de azúcar crudo*. (Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico), Universidad de Matanzas, Matanzas (Cuba).
- Sejati, A., Kasmia, S., & Ikhsan, F. (2019). *The relationship between learning process interactions and student's learning outcomes in environmental sustainability matter geography-social science education subject*. Presentado en: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Selvamuthu, D., & Das, D. (2018). *Introduction to Statistical Methods, Design of Experiments and Statistical Quality Control*. Singapore: Spinger.
- Sunori, S. K., Juneja, P. K., Chaturvedi, M., Aswal, P., Singh, S. K., & Shree, S. (2016). GA based optimization of quality of sugar in sugar industry. *Ciencia e Tecnica Vitivinicola*, ISSN, 0254-0223.

- Thaval, O. (2012). *Modelling the flow of cane constituents through the milling process of a raw sugar factory*. Queensland University of Technology.
- Torres, J. (2019). Una aplicación de la carta de control para medias y rangos (X -R) y análisis de capacidad del proceso – (ACP), en el proceso de la producción de sobres de azúcar personalizados bajo el supuesto de normalidad. *AVANCES: Investigación en ingeniería*, 16(1). doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5130>
- Valentini, M., dos Santos, G. B., & Muller Vieira, B. (2021). Multiple linear regression analysis (MLR) applied for modeling a new WQI equation for monitoring the water quality of Mirim Lagoon, in the state of Rio Grande do Sul—Brazil. *SN Applied Sciences*, 3(1), 70. doi: 10.1007/s42452-020-04005-1
- Vardeman, S., & Jobe, M. (2016). *Statistical Methods for Quality Assurance: Basics, Measurement, Control, Capability, and Improvement* (2 ed.). Nueva York: Springer.

Anexos

Anexo 1: Resultados de las observaciones realizadas al proceso

OBS	Día	CM (10 ³ kg/h)	ME	Fcm	polCM	AI	Landa	Temp	BxJP	BxJM	pMolino	polJP	polJM
1	1	151,17	8,33	16,7	11,90	50,1	1,98	53	19,6	14,7	3100	16,81	12,85
2	1	161,05	14,23	17,2	12,38	52,6	1,90	35	18,7	13,8	3100	16,04	12,48
3	1	162,90	15,44	17,2	13,20	52,3	1,87	39	22,8	16,6	3100	20,82	16,33
4	1	110,08	15,58	18,6	13,16	49,5	2,42	60	23,0	15,9	3100	19,65	15,59
5	2	141,84	7,26	18,0	12,96	55,2	2,16	62	23,2	16,0	3100	19,08	14,85
6	2	163,51	7,70	16,8	13,15	50,3	1,81	64	19,7	14,5	3100	17,29	14,56
7	2	139,75	9,69	16,1	12,30	53,6	2,38	39	18,8	13,3	3100	15,25	11,32
8	2	110,41	10,58	16,7	12,90	50,4	2,73	62	18,8	15,1	3100	15,47	9,85
9	3	140,24	10,69	17,1	12,45	49,2	2,05	72	19,8	15,8	3100	16,63	12,80
10	3	147,31	11,78	17,4	11,89	48,6	1,90	76	20,6	14,0	3100	17,66	13,95
11	3	166,02	14,23	16,9	12,69	50,8	1,81	59	22,8	16,3	3100	20,73	15,23
12	3	129,73	13,48	15,6	11,57	53,2	2,63	55	22,5	16,0	3100	18,03	11,62
13	4	121,18	12,26	16,3	12,57	54,0	2,73	63	22,1	15,4	3100	19,00	12,14
14	4	159,70	11,26	17,4	12,43	44,5	1,60	50	19,3	15,6	2900	16,67	11,10
15	4	135,35	13,45	17,6	12,05	40,8	1,71	35	23,5	15,3	3100	20,10	16,01
16	4	122,58	12,23	16,4	11,73	43,1	2,14	39	21,6	15,0	3100	18,74	14,58
17	5	107,24	7,25	16,3	11,64	55,1	3,15	61	18,7	11,5	3100	15,63	10,55
18	5	130,46	7,47	16,7	12,34	54,8	2,52	82	20,2	14,8	3100	17,34	13,74
19	5	143,16	10,58	18,2	12,07	47,8	1,83	76	19,3	13,9	3100	15,72	12,15
20	5	144,31	6,23	16,9	12,08	53,9	2,21	39	19,3	12,8	3100	15,86	11,78
21	6	110,69	9,26	16,4	11,54	45,8	2,52	53	22,6	16,1	3100	19,49	14,40
22	6	136,00	11,48	17,7	11,23	46,8	1,94	52	23,1	14,4	3100	19,36	15,57
23	6	160,56	14,45	18,1	11,89	44,7	1,54	55	18,0	14,7	3100	15,70	13,03
24	6	138,47	12,32	16,5	12,83	43,2	1,89	63	19,4	14,3	3100	16,25	12,56

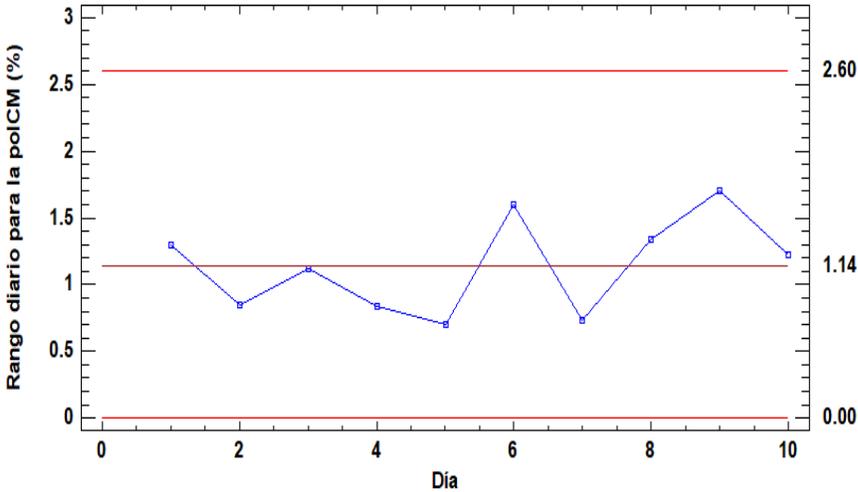
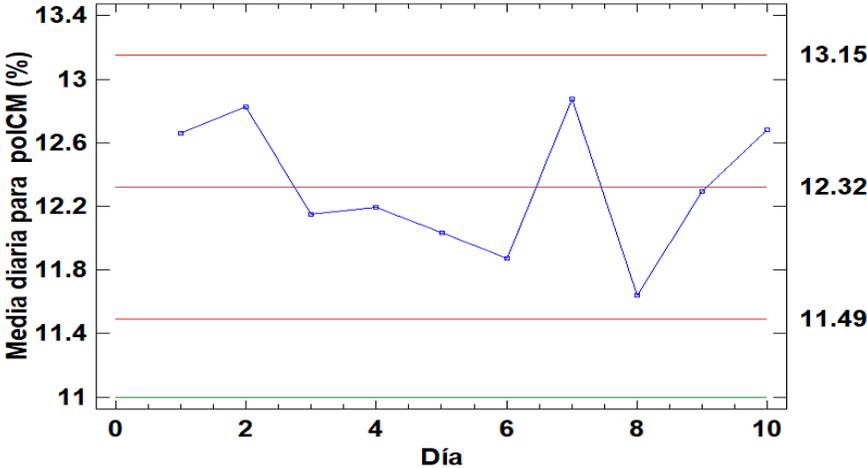
25	7	129,48	10,58	18,4	12,47	43,5	1,83	65	19,9	13,9	3100	16,96	13,38
26	7	153,59	7,89	17,6	13,20	52,6	1,95	79	19,2	16,4	3100	16,41	12,84
27	7	154,78	6,23	17,3	12,78	49,0	1,83	35	19,0	15,9	3000	15,84	12,12
28	7	160,23	9,26	16,5	13,05	51,2	1,94	43	19,8	16,7	3100	16,31	12,41
29	8	159,87	11,87	16,9	11,20	50,3	1,86	70	21,9	14,8	3100	18,74	14,87
30	8	148,45	12,59	17,4	11,87	51,6	2,00	73	17,6	13,1	3100	15,50	12,17
31	8	140,35	8,58	17,1	12,42	49,6	2,07	65	19,8	16,5	3100	16,08	11,80
32	8	118,18	9,48	18,0	11,08	50,8	2,39	60	20,7	15,3	3100	17,03	12,79
33	9	137,48	10,23	17,7	11,34	52,1	2,14	52	19,2	14,6	3100	14,83	11,11
34	9	105,89	11,86	16,4	12,05	47,8	2,75	43	19,7	13,2	3100	16,45	11,15
35	9	139,78	10,89	17,3	12,75	53,2	2,20	60	20,5	15,2	3100	17,53	13,20
36	9	148,92	12,32	17,1	13,04	54,3	2,13	74	20,7	15,7	3100	17,82	13,70
37	10	127,78	10,78	17,1	12,93	45,8	2,10	73	20,5	14,8	3100	16,77	12,82
38	10	94,69	10,89	16,8	12,05	46,7	2,94	62	19,7	12,6	3100	16,86	11,31
39	10	130,47	9,25	18,4	13,27	50,3	2,10	50	19,0	14,8	3100	16,32	13,18
40	10	150,36	7,78	16,9	12,48	47,8	1,88	63	20,1	16,3	3000	17,18	14,79

OBS	Día	poRL	BxRL	Hmd	fRL	RL	JM	Pérdidas	ExJM
1	1	2,16	4,67	49,72	45,61	55,35	145,92	6,65	96,53
2	1	2,28	4,50	51,25	44,25	62,60	151,05	7,16	93,79
3	1	3,05	5,41	51,32	43,26	64,77	150,43	9,19	92,35
4	1	2,15	4,27	51,10	44,63	45,88	113,70	6,81	103,29
5	2	1,94	3,37	50,06	46,57	54,82	142,22	5,79	100,27
6	2	2,42	6,60	49,59	43,81	74,21	169,60	7,06	87,65
7	2	1,91	3,45	50,27	46,28	48,62	144,73	5,40	103,57
8	2	1,52	2,87	50,28	46,85	39,36	121,45	4,20	110,00
9	3	2,41	3,65	49,60	46,75	51,30	138,14	7,08	98,51
10	3	2,15	4,40	51,37	44,22	57,96	137,95	7,12	93,64
11	3	2,60	5,69	49,48	44,83	62,59	154,23	7,72	92,90
12	3	1,65	3,63	50,37	46,00	44,00	138,93	4,84	107,10
13	4	1,87	3,32	49,09	47,60	41,50	133,68	5,09	110,32
14	4	3,09	4,80	52,26	42,94	64,71	139,49	10,07	87,34
15	4	2,76	7,20	50,01	42,79	55,67	120,48	9,42	89,01

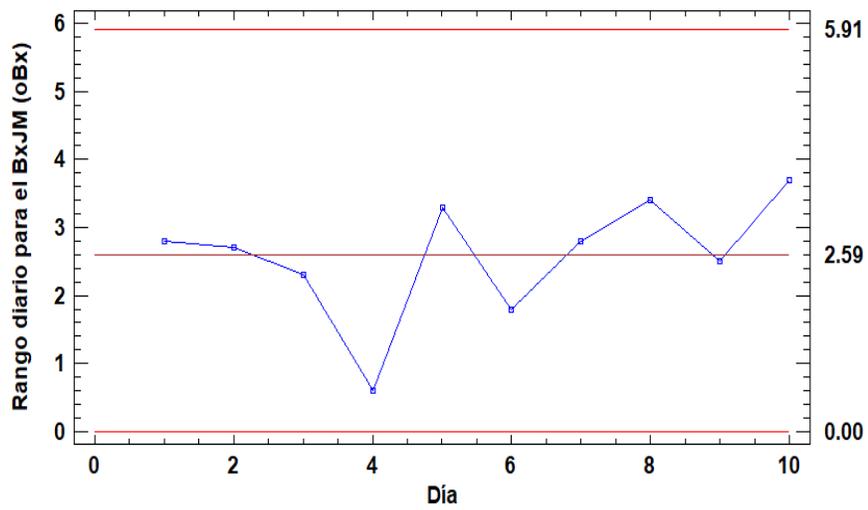
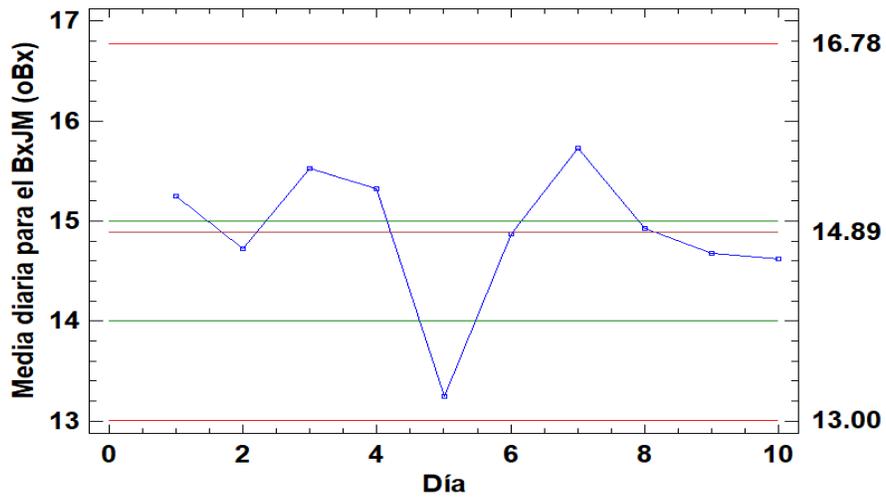
16	4	2,23	4,81	49,57	45,61	44,08	121,60	6,84	99,20
17	5	1,46	2,30	50,85	46,84	37,32	125,02	4,36	116,58
18	5	1,73	3,29	50,98	45,73	47,64	137,62	5,12	105,49
19	5	2,01	4,07	50,81	45,12	57,75	133,21	6,72	93,05
20	5	1,93	3,96	50,24	45,80	53,25	144,96	5,90	100,45
21	6	1,92	3,89	49,27	46,84	38,76	117,73	5,83	106,36
22	6	2,52	5,38	50,43	44,19	54,47	128,33	8,99	94,36
23	6	2,51	5,17	48,30	46,53	62,46	142,80	8,21	88,94
24	6	2,09	4,38	48,83	46,80	48,82	132,85	5,74	95,94
25	7	2,19	4,36	49,43	46,21	51,56	121,42	6,99	93,78
26	7	2,26	4,44	51,00	44,56	60,66	145,53	6,76	94,75
27	7	2,18	5,01	50,88	44,12	60,69	143,09	6,69	92,45
28	7	1,96	4,90	50,41	44,69	59,16	152,27	5,55	95,03
29	8	2,29	4,94	49,42	45,64	59,20	150,97	7,57	94,43
30	8	2,11	4,01	52,50	43,48	59,41	140,64	7,11	94,74
31	8	1,78	6,71	49,83	43,45	55,24	134,71	5,64	95,98
32	8	1,85	3,81	51,52	44,67	47,62	121,36	6,73	102,69
33	9	1,87	4,16	50,64	45,20	53,84	135,74	6,46	98,74
34	9	1,74	3,15	50,62	46,23	37,56	116,13	5,12	109,67
35	9	1,95	3,98	49,87	46,15	52,40	140,58	5,73	100,57
36	9	1,96	4,02	48,52	47,46	53,66	149,56	5,42	100,43
37	10	1,95	4,00	50,63	45,37	48,16	125,42	5,68	98,15
38	10	1,62	2,76	51,99	45,26	35,15	106,24	4,99	112,20
39	10	2,00	3,89	49,86	46,24	51,92	128,85	6,00	98,76
40	10	2,28	4,45	50,45	45,09	56,32	141,84	6,84	94,33

Anexo 2: Gráficos de control para media y rango de las variables estudiadas

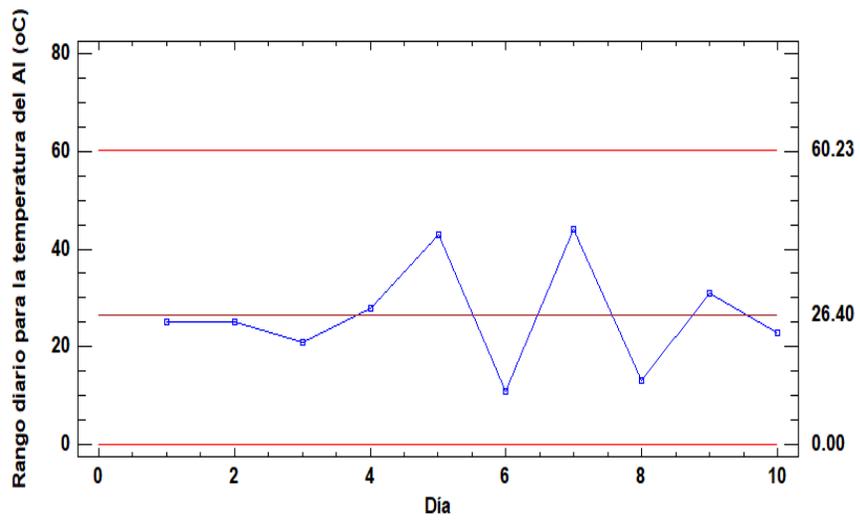
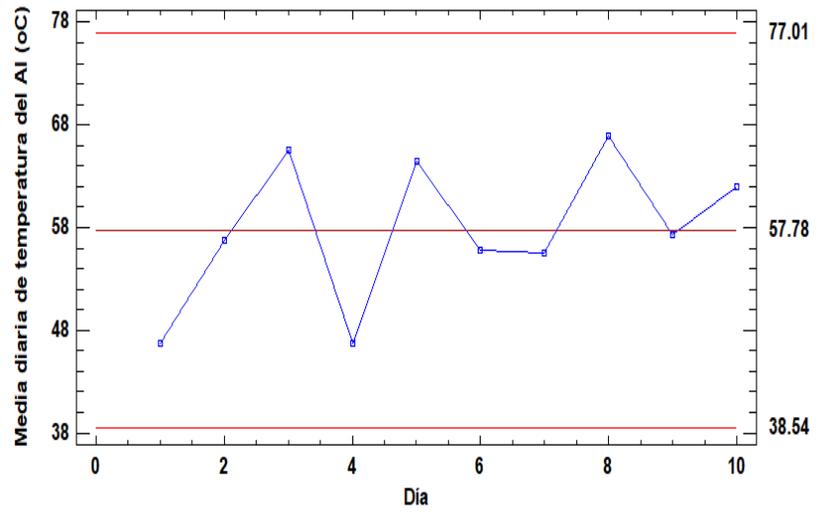
➤ Para la composición de pol en la caña molida:



➤ Para la composición de brix del jugo mezclado:



➤ Para la temperatura del agua de imbibición:



➤ Para la humedad del bagazo:

