

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Propuesta para el ahorro de energía en tándem de  
molinos cañeros sin afectar el proceso de extracción  
de la sacarosa de la caña de azúcar

Tesis presentada en opción al Grado Científico de  
Doctor en Ciencias Técnicas

Jorge Michel Corrales Suárez

Santa Clara

2017

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE QUÍMICA-FARMACIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Propuesta para el ahorro de energía en tándem de molinos cañeros sin afectar la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar

Tesis presentada para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

**Autor:** Prof. Auxiliar, Ing. Jorge Michel Corrales Suárez, MSc.

**Tutores:** Prof. Titular, Ing. José Marcos Gil Ortiz, Dr. C.

Prof. Titular, Ing. Gretel Villanueva Ramos, Dr. C.

Santa Clara

2017

**PENSAMIENTO**

*El desarrollo del espíritu científico técnico en el  
seno de nuestro pueblo tiene que ver con nuestro más  
importante recurso natural que es el hombre y el ahorro de la  
economía.*

*Fidel Castro Ruz.*

## **AGRADECIMIENTOS**

## **Agradecimientos**

A mis tutores, y amigos Dr.C José Marcos Gil Ortíz y Dr.C Pedro Dionisio Remédios Castañeiras, que nunca me dieron un “no” como respuesta ante cualquier aspecto, haya sido relacionado o no con la investigación.

A mi tutora Dr.C Gretel Villanueva Ramos, por su atención, sugerencias y consejos certeros.

A la jefa de turno del laboratorio azucarero de la UEB Fábrica de Azúcar “Antonio Guiteras Holmes”, Alina Peña Álvarez, por hacerme saber que podía contar con ella a cualquier hora para realizar los ensayos que necesitara.

A mi amigo Leonardo López Peña quien, a pesar de estar tan ocupado, viajó tantas veces al tándem para ayudarme a tomar las muestras de bagazo.

A mis amigos Jorge Luis Pérez Serrano y Julio Manuel Gómez Mombiela, por ayudarme incondicionalmente en tantas noches de trabajo.

A mis compañeros de trabajo y amigos, Alejandro Velázquez González, Daniel Rodríguez Peña, Julio Nápoles González, por hacer del Centro de Estudio donde trabajo un ambiente laboral donde se respira ciencia.

Al Dr.C José Antonio Gonzáles Marrero, quién no dudó nunca del resultado de esta investigación.

A todas las personas que de uno u otro modo han tenido alguna influencia positiva en el desarrollo de esta investigación.

A la revolución por darme la posibilidad de superarme.

## **DEDICATORIA**

## **Dedicatoria**

A mi esposa (Yilian Santa González Figueredo) por toda su paciencia, dedicación y comprensión en los momentos más estresantes de este proceso. por su apoyo incondicional, por su interés y confianza en mí, por tantas razones hoy puedo decir que ella es mi amuleto de la buena suerte.

A mis padres (Andrés Iraclides Corrales Góngora y Soraida Suárez Díaz) por su amor incondicional y sacrificio constante para que me pudiera superar profesionalmente.

A mis hermanas (Yunisleydis Corrales Suárez y Tanllisleydis Silva Suárez), quienes dentro de sus posibilidades han cooperado para que pueda seguir adelante.

A todos los miembros de mi familia que han estado al tanto e interesados en que me haga Doctor en Ciencias Técnicas.

A mis hijos (Jorge Andrés Corrales Rivero y Michel Alejandro Corrales Rivero) ellos son mi motor impulsor y el fruto más valioso de mi vida.

A Frasmacio Martínez Pérez, quien considero como un padre, siempre me ha hecho saber que me debo superar en la vida.

## **SÍNTESIS**

## **SÍNTESIS**

La tesis recoge los resultados de una investigación, a escala de laboratorio e industrial, sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos. Se estudió el efecto de la preparación de la caña y el proceso de imbibición sobre el trabajo de los molinos. Fueron objeto de investigación, la reabsorción por el bagazo del jugo extraído y el efecto de las presiones hidráulicas aplicadas en los molinos intermedios del tándem cañero sobre los por ciento de pol y por ciento de humedad en el bagazo residual y el consumo energético del tándem. Se emplearon los diseños estadísticos de experimentos en bloques al azar y factorial  $2^k$ . Se concluye que la disminución de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios, dentro del rango investigado, no tiene influencia significativa sobre los por ciento de pol y humedad en el bagazo residual, pero disminuye la demanda de potencia del tándem. Se proponen dos procedimientos experimentales: 1) La determinación de la abertura de las mazas en el plano neutral, para reajustar las aberturas de trabajo del molino. 2) Cálculo del coeficiente de reabsorción por molino.

# ÍNDICE

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....	7
1.1 Influencia de la preparación de la caña sobre el proceso de extracción en tándem de molinos .....	7
1.2 El Proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos .....	9
1.2.1 El proceso de extracción en el molino.....	15
1.2.2 El proceso de extrusión en el molino .....	22
1.3 La imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos	23
1.4 Reabsorción del jugo en los molinos .....	27
1.5 Ahorro de energía en centrales azucareros.....	31
1.6 Demanda de potencia del tándem de molinos.....	36
1.7 Conclusiones parciales.....	37
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
2.1 Técnicas de laboratorio .....	39
2.2 Determinación del tiempo de retención del bagazo en el tándem .....	39
2.3 Estudio del efecto de la preparación de la caña sobre el % pol y % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem .....	39
2.4 Diseño factorial para el estudio del efecto de la imbibición sobre el % pol y % humedad del bagazo final a escala industrial .....	41
2.4.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.....	42
2.5 Estudio del proceso de lixiviación en tándem de molinos.....	43
2.5.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.....	43

2.6 Determinación experimental de la abertura del plano neutral entra la maza superior y la bagacera .....	44
2.6.1 Procedimiento experimental para determinar la abertura del plano neutral del molino .....	45
2.7 Determinación experimental del coeficiente de reabsorción.....	47
2.7.1 Procedimiento para la determinación del coeficiente de reabsorción .....	47
2.8 Procedimiento para la aplicación de la investigación en tándem de molinos cañeros.....	48
2.9 Diseño factorial $2^k$ para el estudio del efecto de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios sobre el % pol, % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem .....	48
2.9.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.....	51
2.10 Diseño en bloque al azar para la evaluación industrial del efecto de la disminución de presión en los molinos intermedios del tándem .....	52
2.10.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.....	53
2.11 Indicadores de ahorro como resultado de la investigación .....	54
2.11.1 Procedimiento para el cálculo del ahorro de energía en el tándem .....	54
2.11.2 Procedimiento para el cálculo del incremento monetario.....	55
2.12 Conclusiones parciales.....	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.1 Pruebas de hipótesis para el estudio del efecto de la preparación de la caña sobre el % pol, % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem .....	56
3.1.1 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre el % pol en bagazo final.....	57
3.1.2 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre el % humedad en bagazo final.....	58

3.1.3 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre la potencia demanda del tándem de molinos .....	59
3.2 Diseño factorial para el estudio de la imbibición sobre el % pol y % humedad del bagazo final a escala industrial.....	60
3.2.1 Efecto de los parámetros de imbibición en el proceso de extracción para el % pol del bagazo final .....	60
3.2.2 Efecto de los parámetros de imbibición en el proceso de extracción para el % humedad del bagazo final .....	62
3.3 Evaluación del proceso de lixiviación del tándem de molinos. ....	63
3.4 Determinación de la abertura del plano neutral experimental.....	66
3.5 Coeficiente de reabsorción .....	68
3.6 Diseño factorial para el estudio del efecto de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios sobre el % pol y % humedad del bagazo final y demanda de potencia de tándem .....	70
3.6.1 Efecto de la disminución de presión sobre el % pol en el bagazo final .....	71
3.6.2 Efecto de la disminución de presión sobre el % humedad en el bagazo final	71
3.6.3 Efecto de la disminución de presión sobre la demanda de potencia .....	72
3.6.3.1 Modelos matemáticos para la demanda de potencia del tándem.....	74
3.7 Diseño en bloque al azar para la evaluación industrial del efecto de la disminución de presión en los molinos intermedios del tándem.....	75
3.8 Ahorro de energía debido a la disminución de las presiones hidráulicas .....	78
3.9 Conclusiones parciales.....	79
CONCLUSIONES .....	81
RECOMENDACIONES .....	83
REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS .....	86
ANEXOS .....	95

## **INTRODUCCIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**

El uso racional de la energía constituye una de las vías principales para la disminución del consumo energético. El ahorro de energía es imprescindible para la economía y el medioambiente. Debido a las consecuencias del cambio climático y a la exigencia de ahorro de energía como vía hacia el desarrollo sustentable, la eficiencia energética juega un papel fundamental. En Cuba cobra mayor significado por lo limitado de sus recursos energéticos y la transformación que se lleva a cabo con la revolución energética (PCC, 2006) en el sector azucarero. Con el objetivo de disminuir los niveles de consumo de energía se realizan diversos estudios encaminados a soportar, desde bases científicas, las decisiones que tributen a un incremento de la eficiencia energética en la industria y los servicios.

Desde finales de la década de los 80 la economía cubana, en particular la industria azucarera, enfrenta serias dificultades. Debido a la desaparición del CAME, desapareció el principal mercado para nuestro azúcar y proveedor de insumos. En esas condiciones las exportaciones de azúcar tienen que enfrentar los bajos costos del producto en el mercado mundial, unido al recrudescimiento del bloqueo comercial que imponen los Estados Unidos de Norteamérica.

Para superar esta crisis y lograr que la Agroindustria Azucarera ocupe su lugar estratégico en la economía cubana, es imprescindible optimizar la explotación de los recursos disponibles. Este proceso cobra en la actualidad mayor vigencia por encontrarse dentro de los lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución aprobados en el VI Congreso del PCC (PCC, 2011). Como se describe en el capítulo VIII “Política Industrial y Energética”, específicamente en el lineamiento número 246 cuando se hace referencia a elevar la generación de electricidad por la agroindustria azucarera a partir del aprovechamiento del bagazo y residuos agrícolas cañeros y forestales, así como el lineamiento 248 cuando se hace referencia a priorizar y alcanzar el potencial de ahorro identificado en el sector estatal (PCC, 2011).

El proceso industrial de producción de azúcar crudo de caña, implica una primera etapa tecnológica que consiste en la preparación de la caña y posterior extracción de la sacarosa que esta contiene (Jenkins, 1971). Este proceso puede realizarse mediante difusores con o sin molinos de pre - extracción o por el proceso combinado de lixiviación y compresión, en prensas o en tándem de molinos (Kent, 2011; Thaval y cols, 2012b).

En el caso específico de Cuba, el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar se realiza en tándem de molinos. El tándem consume alrededor del 30 % de la energía del central (Barreiro, 2011; Domínguez y cols, 2003; Gómez y cols, 2006; Jáuregui y cols, 2004; Vélez y cols, 2006; Vélez y cols, 2005), en lo que influye, entre otros factores, el empleo de altas presiones hidráulicas. En él existen dos etapas: una de extracción en seco que es la responsable de entregar el alimento (fibra+jugo) a la próxima etapa con el menor por ciento de jugo y una de lixiviación, que es la responsable de reducir económicamente el contenido de sacarosa mezclando lo más uniformemente

posible el jugo sin diluir del interior del bagazo con el agua de imbibición, o con los jugos que se recirculan de molino en molino.

Unas de las prácticas más comunes para incrementar la extracción en el tándem de molinos, consisten en aumentar el flujo del agua de imbibición lo que incrementa el consumo de energía en los evaporadores, la otra variante es aumentar las presiones hidráulicas (Barreiro, 2011) la que incrementa, la extracción de no azúcares, el consumo de energía y el índice de roturas (Hamill, 1972; Hugot *y cols*, 1986; Jenkins, 1971). Una de las vías para disminuir los costos del proceso de producción de azúcar crudo de caña, consiste en disminuir el consumo de energía. Para ello es de vital importancia que se apliquen las presiones hidráulicas en los molinos del tándem, a partir de criterios científicamente fundamentados.

La tendencia general en las publicaciones científicas acerca del ahorro de energía en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, son varias (Díaz *y cols*, 2012b; Espinosa, A M *y cols*, 2011; Gil, J M *y cols*, 2011; Goytisolo *y cols*, 2012; Lewinski *y cols*, 2013; Nápoles *y cols*, 2006), pero ninguna dirigida al ahorro de energía por disminución de la aplicación de presiones hidráulicas, sin embargo, influyen notablemente en este consumo.

La existencia de un plano neutral en el molino indica que debe existir un límite práctico para las presiones a aplicar, a partir del cual no aumenta la extracción con el incremento de la presión. Esta situación sugiere que es posible racionalizar las presiones hidráulicas en los molinos, pues las elevadas presiones que se aplican en los molinos del tándem aumentan el consumo de energía, mientras que la temperatura y el flujo del agua de imbibición generalmente no se encuentran dentro de los rangos establecidos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto en este trabajo se pretende resolver el siguiente problema científico:

**Problema científico**

¿Cómo disminuir el consumo de energía del tándem sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y el por ciento de humedad en el bagazo final?

Para ello se parte de la siguiente hipótesis:

**Hipótesis:**

Si se racionalizan los valores de las presiones hidráulicas a aplicar en los molinos intermedios, es posible disminuir el consumo de energía del tándem sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y el por ciento de humedad en el bagazo final.

El objetivo general de esta investigación se plantea como:

**Objetivo general:** Disminuir el consumo de energía del tándem mediante la racionalización de las presiones hidráulicas, sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y el por ciento de humedad en el bagazo final.

Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

**Objetivos específicos:**

1. Determinar la influencia de la preparación de la caña sobre la extracción, por ciento de humedad del bagazo final y la demanda de potencia del tándem.
2. Verificar la influencia de los parámetros de la imbibición sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y el por ciento de humedad en el bagazo final.
3. Elaborar un procedimiento para determinar experimentalmente la abertura del plano neutral y el coeficiente de reabsorción, que tenga en cuenta implícitamente las

propiedades físicas de la caña, la eficiencia del proceso de lixiviación y las condiciones mecánicas y de operación del tándem.

4. Realizar la determinación y evaluación de la disminución de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, el por ciento de humedad en el bagazo final y la demanda de potencia del tándem a escala industrial.

La novedad de esta investigación radica en proponer un procedimiento que permita disminuir el consumo de energía en tándem de molinos cañeros sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar.

Como aportes se pueden señalar los siguientes:

1. Un procedimiento experimental para determinar la abertura del molino en el plano neutral.
2. Un procedimiento experimental para determinar el coeficiente de reabsorción.
3. La aplicación práctica de este trabajo se puede generalizar a cualquier central del país.

Estructura de la tesis es la siguiente:

Se encuentran dividido en: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

En el capítulo 1, Marco teórico referencial, se recogen los aspectos más importantes que han sido estudiados sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, teniendo en cuenta la preparación de la caña, la lixiviación, el coeficiente de reabsorción y el ahorro de energía. En el Capítulo 2, Materiales y métodos, se describen todos los procedimientos empleados para el desarrollo de la investigación. En el Capítulo 3,

Resultados y discusión, se divulgan y discuten los resultados obtenidos y se proponen soluciones para la obtención de un ahorro de energía en el tándem de molinos sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Finalmente se arriba a seis conclusiones y se proponen dos recomendaciones.

## **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

## **1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

### **1.1 Influencia de la preparación de la caña sobre el proceso de extracción en tándem de molinos**

Los tallos de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* Linn) están constituidos, principalmente, por haces fibrovasculares que forman la parte fibrosa de la planta y por células parenquimatosas o paredes de las celdas de jugo, que tienen una constitución esponjosa y se distinguen fácilmente de forma ampliada, mediante la observación al microscopio de un corte transversal del tallo. A su vez es posible distinguir dos tipos de fibras que pudieran denominarse centrales y corticales. Los haces centrales forman la masa interna del tallo y las segundas la corteza (Suárez, R R y *co/s*, 1982).

El concepto moderno de preparación de la caña consiste en lograr romper en la caña la mayor cantidad posible de las celdas de jugo para facilitar la extracción posterior por compresión y lavado (Barreiro, 2011). Esto persigue varios objetivos esenciales entre los que se destacan el aumento de la capacidad de los equipos de extracción del jugo, aumentar la facilidad de la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar por compresión de la caña por los molinos y lograr un mayor agotamiento del bagazo al hacer más eficiente el contacto del agua de imbibición o de lavado con el jugo interior de las células

abiertas o rotas de la caña (Sanfiel y cols, 2004).

La preparación de la caña se realiza mediante equipos especialmente diseñados para este fin, como lo son: la desmenuzadora, la desfibradora y las cuchillas giratorias (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Spencer y cols, 1974). En Cuba la caña se prepara con juegos de cuchillas, no siendo suficiente su preparación y como consecuencia el tándem asume parte de esta tarea en lugar de dedicarse solamente a la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar.

El costo de la energía de un central azucarero es tan bajo, que aunque la preparación de la caña requiera considerable energía adicional, el costo de tal energía se resarce sobradamente con cualquier ganancia en la extracción o la capacidad (Jenkins, 1971).

Una buena preparación de caña favorece el trabajo de la planta moledora, trayendo cuantiosos beneficios económicos, pues se obtiene: mayor capacidad de molienda, mayor extracción en el tándem y menor demanda de potencia en los molinos (Corrales y cols, 2015a).

En la actualidad se investiga el proceso tecnológico de la preparación de la caña de azúcar a moler con el objetivo de evaluar su eficiencia y detectar los principales problemas en dicho proceso (Morejón y cols, 2013). Otros autores han estudiado cómo influye la preparación de la caña sobre la compresibilidad del bagazo en condiciones estáticas (Gil, J M y cols, 1998). Dovale (Dovale, 2013) realizó un estudio de una zafra completa teniendo en cuenta los valores reales de la preparación de la caña obtenidos de las mediciones realizadas por el laboratorio del central, sobre la influencia en las variables por ciento de pol, por ciento de humedad y demanda de potencia del tándem. Demostró que la preparación de la caña incide de manera significativa en el proceso de

extracción y la humedad del bagazo final y que estos mejoran con su aumento. Del mismo modo demostró que mientras mejor preparación tiene la caña, menor será el consumo de energía en el tándem de molinos y más eficiente será este.

Inskip (Inskip, 2010) demostró que al mejorar la preparación de caña, no importa el modo en que se haga, los beneficios son alentadores porque se propicia una disminución de la demanda de potencia de la planta moledora.

Loughran (Loughran y cols, 2002) desarrolló un modelo computacional para estudiar la influencia de la preparación de la caña en el proceso de molienda, sobre la base de mejorar la recuperación de sacarosa y minimizar las humedades finales, teniendo en cuenta la velocidad de drenaje del jugo en los molinos a través de los poros del bagazo. Este modelo se basa en la gran deformación mecánica de los medios porosos y utiliza técnicas de elementos finitos para resolver las ecuaciones.

## **1.2 El Proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en tándem de molinos**

Un molino consiste esencialmente de tres cilindros horizontales llamados mazas, que exprimen la caña que pasa entre ellos para extraerles el jugo. Las mazas se colocan formando un triángulo isósceles dentro de una estructura de acero llamada virgen. La maza colocada en la parte superior del triángulo se denomina “superior” y las otras dos, que están situadas en un plano inferior, “cañera” y “bagacera”. Las mazas constan de un eje central de acero, el guijo, sobre el que se prensa un tambor de hierro fundido (Barreiro, 2011). La cuarta maza es para ayudar a la alimentación del molino (Hugot y cols, 1986). El ajuste de los molinos depende de la razón de molienda diaria y de la magnitud de la preparación previa que tenga la caña (Jenkins, 1971).

El proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en el tándem de molinos se puede considerar dividida en dos etapas: una de extracción en seco y otra en húmedo (Hamill, 1972). La de extracción en seco, propiamente dicha, puede estar constituida por una desmenuzadora y un primer molino, o sólo por un primer molino o uno desmenuzador. Esta etapa es la que entrega el alimento (fibra + jugo) a la etapa de extracción en húmedo. En este bagazo la relación (masa de jugo/masa de fibra de caña) dependerá de la preparación de la caña y de la efectividad de la etapa de extracción en seco, es una primera etapa para extraer por compresión la mayor cantidad posible del jugo de las células abiertas retenido por el bagazo. En la segunda, el objetivo es lixiviar mediante el proceso de imbibición la sacarosa del jugo retenido por el bagazo y llevar a este último, en el último molino, a un porcentaje de humedad que permita utilizarlo económicamente como combustible (Kent y cols, 2012; Mann, 2010). Una reducción en la humedad del bagazo produce un aumento en la eficiencia en las calderas, y por consiguiente una reducción en el consumo del bagazo para una producción de vapor (Mann, 2010).

Con la imbibición compuesta, el proceso de extracción en húmedo se acerca a uno de lixiviación a contracorriente, donde cada etapa está constituida por el molino y el tramo de transportador que lo alimenta (Gil, J M, 2011). Los cálculos implicados en el diseño de procesos de lixiviación son ampliamente conocidos (Treybal, 1977). Sin embargo, la lixiviación de la sacarosa en la etapa de extracción en húmedo en los molinos del tándem cañero, es un proceso poco estudiado y muy complejo e ineficiente debido al gran poder de absorción del jugo por el bagazo, a la complejidad de la matriz porosa y al diseño del sistema existente en el tándem de molinos cañeros (Gil, J A y cols, 1999). En la operación

del tándem prevalece el criterio mecánico en los técnicos y operarios para todos los molinos, aunque los procesos internos que ocurren en las etapas de extracción en seco y en húmedo son sustancialmente diferentes (Gil, J M, 2011) . Se ha caracterizado experimentalmente el proceso de compresión para diferentes superficies, demostrándose que la energía consumida en el proceso se ve afectada por el tipo de superficie de compresión (Díaz y cols, 2012b; Oliver y cols, 2007), pero no se refieren a valores de presiones hidráulicas.

Existen modelos para estudiar el flujo de jugo a través de los molinos (Adam y cols, 2005; 2007; Thaval, 2012; Thaval y cols, 2012a; Thaval y cols, 2012b; 2012c), pero en su mayoría tienen como limitante que se han aplicado al primer y al último molino, aún así, en estos molinos los resultados muestran que una porción significativa del jugo se extrae en el primer molino, tal y como lo describe Hugot (Hugot y cols, 1986). Algunos autores han estudiado el fenómeno de la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar muy puntualmente en un molino (Azaret, A y cols, 2005), otros mediante la adición de un surfactante en el agua de imbibición para intensificar el proceso de extracción en los molinos del central azucarero y han obtenido resultados muy alentadores (Gil, J M, 2011; Gil, J M y cols, 2000a; Gil, J M y cols, 2000b).

Díaz (Díaz y cols, 2012a) propuso un modelo matemático para la determinación de los principales parámetros requeridos en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, por medio de rodillos cilíndricos, considerando la especificidad de comprimir tallos de caña, lo que lo diferencia de los otros modelos que consideran la extracción del jugo.

En las fábricas de azúcar se ha tratado de maximizar el rendimiento en la extracción. La cantidad de agua de imbibición aplicada a los molinos tiene un gran efecto en la reducción del por ciento de pol en el bagazo final (Lloyd y *cols*, 2010). En general se reconoce que la imbibición mejora el proceso de extracción (Hugot y *cols*, 1986; Jenkins, 1971); sin embargo, el lado negativo es que los evaporadores tienen que ser capaces de evaporar el agua extra. Se estudia la posibilidad de insertar un dispositivo que sea capaz de dar una medición en tiempo real del por ciento de fibra de la caña para proporcionar un valor de control para la adición del agua de imbibición. Esto da la ventaja de añadir la cantidad de agua necesaria en el proceso de extracción (Lloyd y *cols*, 2010).

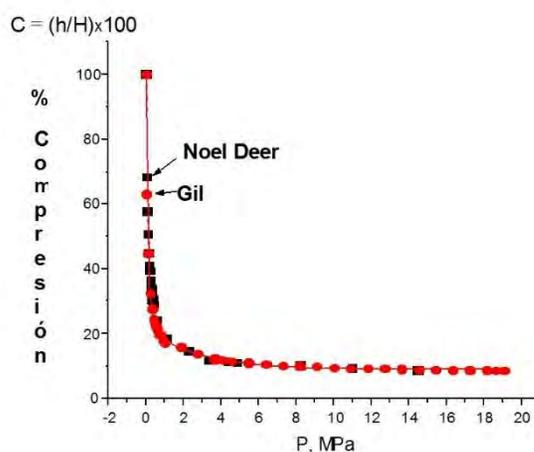
Nawi (Nawi y *cols*, 2013; Nawi y *cols*, 2012) diseñó un dispositivo sobre la base de técnicas espectroscópicas acopladas con redes neuronales artificiales que tienen el potencial a ser usado para determinar in situ el Brix de la caña de azúcar con más precisión en las mediciones, por tanto más confiable. Esto da la posibilidad de conocer el Brix de la caña antes de tomar la decisión de realizar el corte.

Espinosa y Goytisoló (Espinosa, A y *cols*, 2005; Goytisoló y *cols*, 2012) han estudiado las posibilidades de mejorar la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar mediante la aplicación de las presiones hidráulicas óptimas en cada pistón de la maza superior. Con esto se pretende lograr que garanticen que la maza superior se mantenga en posición horizontal (Arzola y *cols*, 2007; Espinosa, A y *cols*, 2005; Goytisoló y *cols*, 2012).

Quintero (Quintero y *cols*, 2005) expone un modelo matemático estacionario de la etapa de extracción de jugos con la finalidad de poder realizar un análisis operacional de ella. Demostró que con la disminución del flujo de imbibición las extracciones de Brix y de jugo

disminuyen y las pérdidas de pol en el tándem se elevan, y que con el aumento del flujo de imbibición se incrementa la humedad del bagazo a la salida del último molino. Estos resultados concuerdan con la práctica industrial (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971). Él concluye, al igual que otros autores (Corrales y cols, 2015b; Gil, J M, 2011) que el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar es un proceso combinado de lixiviación y compresión.

Hugot y Jenkins (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971) reseñan estudios de compresibilidad en condiciones estáticas, realizados por Deerr (Deerr, 1912), donde se muestra cómo inicialmente la compresión del bagazo disminuyó rápidamente con el incremento de la presión y luego, a partir de una determinada compresión, esta disminución fue cada vez más lenta hasta que prácticamente se hizo constante (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971). Estos estudios fueron repetidos por Gil y otros (Gil, J M, 2011; Gil, J M y cols, 1998) con un mayor rango de presiones. La curva obtenida se superpone a la de Deerr (Deerr, 1912) (Fig. 1.1).



**Fig. 1.1.** Comparación entre los resultados de Deerr y Gil.

Shannon (citado por (Jenkins, 1971)) realizó estudios de compresión rápida en una

prensa de laboratorio. Las presiones obtenidas, para una misma compresión, son considerablemente más altas que las obtenidas por Deerr (citado por (Hugot y *cols*, 1986; Jenkins, 1971). Atherton y Shannon (citados por (Jenkins, 1971) estudiaron la influencia del tamaño de las partículas de la caña preparada sobre la compresión (Jenkins, 1971). Estos autores determinaron que la presión de equilibrio aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Un resultado similar obtuvieron Gil y otros (Gil, J A y *cols*, 1999; Gil, J M y *cols*, 1998). En todos los casos, tanto para compresión lenta como rápida, la forma de las curvas de compresión obtenidas como función de la presión son similares a las de Deerr (citado por (Jenkins, 1971)).

Hugot (Hugot y *cols*, 1986) varió simultáneamente las presiones en todos los molinos y verificó la hipótesis de que las altas presiones favorecen el proceso de extracción. No obstante, en experimentos realizados (Gil, J M, 1998; Gil, J M y *cols*, 1998), tanto a escala de laboratorio como industrial, se obtuvo que existe una presión hidráulica, la que depende de las características técnicas y condiciones de molienda en el molino, a partir de la cual la extracción de jugo se incrementa muy poco. Al incrementar la presión hidráulica en el molino, aumenta la demanda de potencia así como el desgaste en chumaceras y engranajes (Hugot y *cols*, 1986; Jenkins, 1971; Spencer y *cols*, 1974). Además, se descubrió que la capacidad de drenaje del bagazo es una función inversa de la presión de las mazas, pero no inversamente proporcional (Hamill, 1972). Estos resultados han pasado inadvertidos para los técnicos y operadores del tándem en los centrales azucareros, que siguen indiscriminadamente el criterio de Hugot (Hugot y *cols*, 1986), de aplicar las mayores presiones hidráulicas en los molinos sin tener en cuenta el consumo de energía y el posible aumento del índice de roturas. Además, en la literatura se

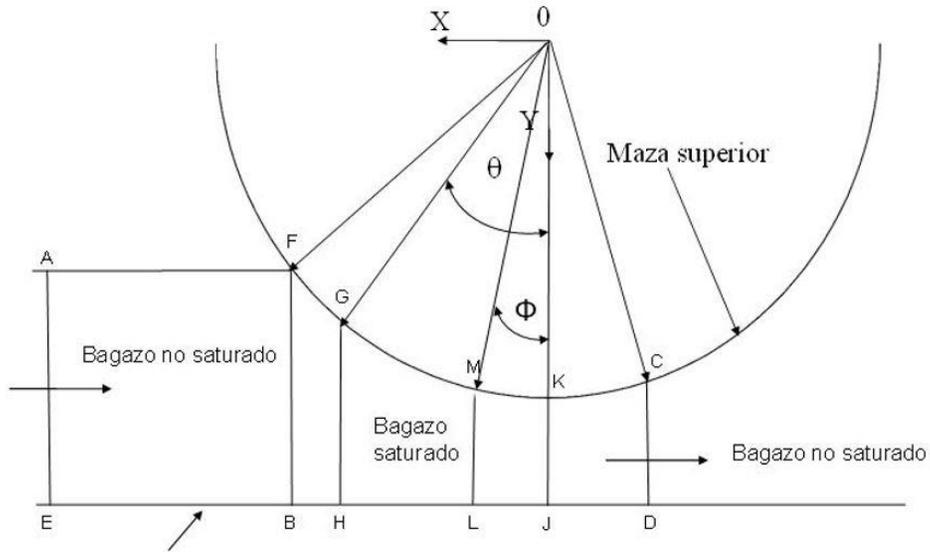
recomiendan rangos de presiones para la operación de los molinos, pero no se reporta un procedimiento para elegirlos que permita una adecuada extracción con el menor consumo de energía.

La composición del jugo que se extrae de la caña está influenciada por la magnitud de la presión con que este es extraído (Pedrosa, 1975). Quincoses (Quincoses, 1989) señala que el mayor por ciento de extracción de proteínas y péptidos ocurre en la desmenuzadora y el primer molino, mientras que la extracción de aminoácidos aumenta hacia el sexto molino. A presiones moderadas las paredes celulares se rompen, dejando escapar el jugo puro de las celdas, pero a presiones mayores comienzan a ser extraídos jugos impuros del protoplasma y de la corteza (Jenkins, 1971; Pedrosa, 1975; Spencer y cols, 1974). En todo caso, la presión hidráulica aplicada a cada molino debe ser suficiente para lograr el nivel de extracción requerido a un costo conveniente (Hamill, 1972). Sin embargo, estos autores solo tienen en cuenta los aspectos mecánicos del molino, sin tener en cuenta el comportamiento del colchón de bagazo y no indican cómo determinar las presiones hidráulicas que se deben aplicar.

A pesar de todos los inconvenientes señalados anteriormente, la tendencia general es el empleo de las altas presiones hidráulicas en los molinos, sin que aparezca un procedimiento científicamente fundamentado para su selección.

### **1.2.1 El proceso de extracción en el molino**

La descripción del proceso de extracción en el molino y los mecanismos del proceso de flujo y transferencia de masa se realiza partiendo del modelo de Murry y Loughran (Loughran, 1990; Murry, 1996) (Fig. 1.2). Según este modelo el bagazo que llega a la región comprendida entre los planos AE y BF está parcialmente saturado.



Plano central entre las mazas superior y bagacera, perpendicular al plano axial.

**Fig. 1.2.** Modelo del proceso de extracción en el molino.

A partir de BF inicia el proceso de compresión del bagazo; este comienza a ser comprimido expulsando el aire ocluido a medida que disminuye la porosidad. Bajo estas condiciones las capas superiores del colchón se saturan primero que las capas inferiores y el exceso de jugo drena hacia el interior del colchón de bagazo, mezclándose con el jugo libre en el espacio entre las partículas y penetrando por capilaridad en los poros de las partículas de meollo, a medida que el bagazo avanza hacia el GH.

El bagazo que alcanza el plano GH, desde el punto de vista macroscópico, se puede considerar que está saturado. No obstante, aún queda aire ocluido entre las partículas y principalmente en los capilares del meollo. Ya en estas condiciones el proceso de dilución del jugo del interior de las partículas sólo es posible mediante el movimiento del líquido por capilaridad hacia el interior de los poros, donde se establece el equilibrio de concentraciones de los sólidos solubles por difusión y posteriormente, por este mismo mecanismo, desde el interior hacia la película inmóvil de jugo que rodea la partícula (Gil,

J M, 2011). El grueso de la capa límite que rodea a las partículas y, por lo tanto, su resistencia a la transferencia de masa, depende en proporción directa de la viscosidad y de la tensión superficial del jugo que la forma (Treybal, 1977).

A partir del plano GH comienza el proceso visible de extracción del jugo por el molino. Entre los planos GH y JK (plano axial) el bagazo está saturado (todo el volumen de huecos entre las partículas está lleno de jugo, aunque no así en el interior de todas las partículas). A medida que disminuye la porosidad del bagazo bajo la acción de la presión que ejercen las mazas, el exceso de jugo es forzado a fluir, en sentido contrario al movimiento del bagazo, por los espacios entre las partículas deformadas hacia las zonas de baja presión (superficie de las mazas y hacia el exterior por el plano central). El movimiento del jugo en el bagazo cumple las leyes que gobiernan del flujo de fluidos a través de medios porosos (Murry, 1996). Durante este proceso de flujo continúa la transferencia de masa entre el jugo en movimiento de menor concentración y la película de la retención estática de mayor concentración. Las sustancias con actividad superficial, al disminuir la tensión superficial y la viscosidad del jugo, provocan la disminución del espesor de la película de la retención estática, lo que intensifica el proceso de transferencia de masa (Gil, J M, 2011). La resistencia al drenaje del jugo depende además, en proporción directa, de la preparación de la caña (Hamill, 1972; Loughran, 1990; Murry, 1996) y de la velocidad de compresión (Jenkins, 1971). A partir del plano GH el jugo que ocupa los espacios entre las partículas comienza a ser desplazado por el de su interior, de mayor concentración. En condiciones ideales, si todo este jugo fuera desplazado, el jugo de la retención estática tendría la misma concentración que la del que fluye y cesaría por lo tanto el proceso de transferencia de masa (Gil, J M, 2011).

A medida que disminuye la porosidad, las fuerzas capilares que retienen el jugo en los poros de las partículas aumentan rápidamente en razón inversa al radio de los capilares y son directamente proporcionales a la tensión superficial del jugo retenido (Gil, J M, 1998).

El análisis del proceso de distribución del líquido de imbibición en el colchón de bagazo y su incidencia en el proceso de transferencia de masa hay que dividirlo en dos partes: el proceso en el conductor de bagazo y el proceso en el molino, ya que ambos son diferentes (Treybal, 1977). La profundidad a la que penetra el agua de imbibición que rocía una caja de derrame, en el colchón de bagazo parcialmente saturado, depende de la tensión superficial del líquido de imbibición y de las características del bagazo como medio poroso. La masa de agua aplicada sólo es capaz de saturar una capa superficial del colchón de bagazo suelto (Gil, J A y *co/s*, 1999); sin embargo, en el molino la masa total de bagazo se satura cuando el volumen de éste es reducido por compresión hasta un valor definido a la entrada del molino (Gil, J M, 1998). Al continuar la compresión, el líquido es forzado a fluir a través del medio poroso, lo que provoca su mezcla forzada con el jugo retenido por la fibra del bagazo.

Luego que la capa superior del colchón de bagazo ha absorbido la masa de líquido que es capaz de retener de acuerdo con su saturación inicial, las propiedades del líquido y las características geométricas de las partículas, el exceso de líquido drena hacia el interior del colchón bajo la acción de la gravedad. El líquido se mueve en régimen laminar sobre la película de jugo que recubre al sólido, quedando retenido en parte en las cavidades de las partículas y sus uniones, al tiempo que penetra por capilaridad en el interior de los poros de las partículas de meollo parcialmente saturadas por el jugo

residual. La tensión superficial contribuye a la penetración del agua en los poros del meollo como una fuerza impulsora. Sin embargo, se oponen las fuerzas de fricción debido a la viscosidad y la resistencia que ofrece el aire al salir del capilar en sentido contrario. Simultáneamente, con el movimiento del líquido se produce el proceso de transferencia de masa por difusión de los sólidos solubles del jugo libre hacia el agua, por lo que se alcanza el equilibrio de concentraciones rápidamente (Pérez, S R, 1992) entre la película de jugo y el seno del líquido, lo que dependerá del Brix del líquido de imbibición y del Brix del jugo retenido. La viscosidad del líquido de imbibición siempre será menor que la del jugo retenido (Honig, 1979; Pávlov y cols, 1981). El resultado global de este proceso es un incremento en la saturación parcial de una capa de la superficie del colchón de bagazo. El tiempo que demora el proceso de penetración es pequeño, en comparación con el que demora el bagazo imbibido en el conductor antes de entrar al próximo molino. En el caso de las células que no fueron rotas durante el proceso de preparación de la caña, o bajo la acción de las fuerzas de cizallamiento entre las mazas de los molinos de extracción en seco, el agua penetra a través de las paredes celulares por ósmosis, lo que aumenta su turgencia y facilita que sean desintegradas entre las mazas de los molinos de extracción en húmedo. La temperatura del agua de imbibición influye en el proceso descrito, ya que al aumentar ésta disminuyen su viscosidad y la tensión superficial, lo que provoca una menor capacidad de retención del medio y, como consecuencia, una mayor penetración de ésta en el colchón de bagazo, al tiempo que aumenta el coeficiente de difusión de los sólidos solubles. El resultado es un mejor mezclado.

La lixiviación consiste en la disolución selectiva de un soluto retenido u ocluido por una matriz sólida. La lixiviación del soluto retenido en el interior del sólido implica la

penetración del líquido en los poros del sólido, disolviendo los componentes a extraer (Treybal, 1977). Para que ocurra un proceso de lixiviación debe existir un primer momento donde ocurra un mezclado entre el solvente y el sólido que contiene el soluto, lo cual se ve muy afectado en el proceso de imbibición del bagazo (Riera, 1996; Sevilla *y cols*, 1977) debido al gran poder absorbente del bagazo (Gil, J A *y cols*, 1999; Gil, J M, 2011). En el tándem de molinos este proceso tiene lugar en los conductores intermedios de los molinos de extracción en húmedo donde se le añade al bagazo en el caso del último molino el agua de imbibición o los jugos que se recirculan de molino en molino en el resto. En segundo lugar, debe haber un proceso de separación del sólido del solvente+solute (jugo). Esto ocurre en los molinos mediante el proceso de compresión del bagazo imbibido. La velocidad de transferencia de masa en el mezclado depende de la forma, dimensión y por ciento de fibra de las partículas sólidas y las características del líquido de lixiviación. La forma, dimensión de las partículas sólidas depende del proceso de preparación de la caña. Las características principales del líquido de lixiviación dependen en gran medida de la temperatura, pues con el incremento de ella disminuyen su viscosidad y la tensión superficial. Con la disminución de la viscosidad se incrementa el coeficiente de difusión de los sólidos solubles (Treybal, 1977), con la disminución de la tensión superficial disminuye la capacidad de retención del medio poroso y se incrementa la penetración del líquido lixivante en el colchón de bagazo, por tanto, un mejor mezclado e incremento de la extracción del soluto.

En el proceso combinado de lixiviación - compresión existen resistencias a la transferencia de masa. El soluto extraído debe vencer primero la resistencia a la difusión que le ofrece la estructura interna del cuerpo sólido. Luego la resistencia de la película

líquida adherida a la superficie del sólido, para llegar a la masa principal del solvente. Por tanto, la transferencia de masa de la sacarosa al líquido de imbibición dependerá de dos mecanismos fundamentales diferentes: el primero consiste en la difusión molecular del soluto a través de la capa límite y el segundo está dado por el transporte convectivo porque el soluto transferido por difusión una vez que sale de la capa límite, llega al fluido y es arrastrado junto con él de un punto a otro.

Existen factores que influyen en la aparición de las resistencias a la transferencia de masa. Uno de ellos es la preparación de la caña, la que influye directamente en el tamaño de la partícula sólida (bagazo). Con el incremento de la preparación de la caña disminuye el tamaño de las partículas facilitando el proceso de difusión entre el solvente (agua o jugo) y el soluto (sólidos solubles) contenido en el sólido e incrementa la superficie de contacto entre el solvente y el sólido. Otro factor es la temperatura, el efecto de la imbibición depende entre otros factores de la calidad del sistema de distribución del agua en el caso del sexto molino, o de los jugos que recirculan de molino en molino en el caso de los molinos intermedios. Se conoce que el bagazo es capaz de absorber aproximadamente de ocho a diez veces su peso en jugo (Gil, J A y cols, 1999; Gil, J M, 2011), al aplicar el sistema de imbibición solo se satura la capa superficial del bagazo en los conductores intermedios por lo que el resto de la sección transversal del colchón de bagazo no recibe líquido de lixiviación (agua o jugo), esto dificulta el fenómeno de transferencia de masa. Otro factor es el tiempo de contacto entre el solvente y el soluto contenido en el sólido. Sin embargo, en el caso del bagazo con el incremento de este tiempo no favorece notablemente el proceso global de transferencia de masa en el colchón de bagazo, por ser un proceso que solo ocurre en la capa superficial. Este

razonamiento coincide con lo planteado por Hugot (Hugot y cols, 1986) de que el aumento de la longitud del conductor entre molinos no incrementa la extracción. Por tanto, es favorable añadir el líquido de imbibición (jugo o agua) a la salida del molino anterior, donde el bagazo comprimido comienza a expandirse y absorbe de forma más uniforme el solvente (agua o jugo intermedio) y no a la entrada del molino.

### 1.2.2 El proceso de extrusión en el molino

Según Jenkins (Jenkins, 1971), desde la entrada al molino y en determinada región, la velocidad promedio  $S_s$  del material sólido (bagazo) es diferente de la componente horizontal de la velocidad superficial de la maza  $S_h$ , hasta el plano ML (Fig. 1.2); este plano recibe el nombre de plano neutral. Jenkins y Murry (Jenkins, 1971; Murry, 1996) señalan que, a partir de ese plano,  $S_s > S_h$ , el incremento de velocidad desde el plano ML (Fig. 1.2) hacia el plano axial tiene que ser causado por un “gradiente de presión” de alguna especie. Gil (Gil, J M, 2011) propone una explicación para este fenómeno. La posición del plano ML (Fig. 1.2) según Jenkins y Murry (Jenkins, 1971; Murry, 1996) se determina a partir de la ecuación (1.1):

$$\phi = \cos^{-1} \left\{ \frac{\left[ \left( 1 + \frac{ADS}{D} \right) + \sqrt{\left( 1 + \frac{ADS}{D} \right)^2 - 4k \frac{ADS}{D}} \right]}{2} \right\} \text{ donde:} \quad (1.1)$$

$k$  : Coeficiente de reabsorción.

$ADS$  : Abertura dinámica de salida (m).

$D$  : Diámetro promedio de los diámetros medios de las mazas (m).

La longitud de este plano se determinar a partir de la ecuación (1.2).

$$Apn = D(1 - \cos \phi) + ADS \quad (1.2)$$

A medida que aumenta el diámetro de las mazas del molino, si se mantiene la misma velocidad angular, la posición del plano neutral se aleja del plano axial. La velocidad de compresión y su variación de un plano vertical a otro serán mayores, por lo que el coeficiente de reabsorción debe aumentar. Este razonamiento coincide con lo planteado por Spencer (Spencer y cols, 1974) acerca de una mayor eficiencia de los molinos cuando es menor la velocidad de las mazas.

### **1.3 La imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa en tándem de molinos**

El proceso de adición de agua en tándem de molinos se conoce como imbibición (Hamill, 1972; Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Riera, 1996; Spencer y cols, 1974). El agua de imbibición se añade al bagazo, el cual es un medio poroso. La capacidad de un medio poroso para retener un líquido depende de la afinidad de este con el sólido, de sus propiedades y de la estructura del sólido (Treybal, 1977). Las fuerzas que retienen a los líquidos que mojan a un sólido poroso son de origen capilar y dependen de la tensión superficial y las dimensiones de los capilares (Treybal, 1977). No obstante, la tensión superficial y la viscosidad están muy influenciadas por la temperatura (Honig, 1979). Estos fenómenos están presentes en el proceso de extracción de la sacarosa en el tándem de molinos (Gil, J A y cols, 1999).

Para extraer la sacarosa contenida en el jugo retenido por el bagazo, este debe ser reemplazado por agua, lo que sólo se logra parcialmente en la práctica. De la efectividad y magnitud de este reemplazo dependerá el por ciento de recuperación que se logre, así como su influencia sobre el costo del proceso de producción de azúcar. En el caso del proceso de extracción por imbibición y compresión, la eficiencia total del sistema

depende del rendimiento de cada una de las etapas de adición de agua o del jugo lixivante y la posterior separación del jugo diluido del bagazo (Gil, J M, 1998). Dado que el número de molinos en un tándem es fijo, para que la imbibición sea eficiente, cualquiera que sea el esquema utilizado, se requiere que en las primeras unidades de extracción en seco se obtengan altas extracciones. De esta manera, la cantidad de jugo a diluir será menor y en cada unidad subsiguiente se logrará un nivel de extracción adecuado. Una alta compresión en el último molino reducirá la humedad del bagazo (Hamill, 1972; Jenkins, 1971), pero al utilizar las elevadas presiones hidráulicas para lograr la alta compresión aumentará el consumo de energía del tándem y se favorecerá la extracción de no azúcares (Hugot y cols, 1986), perjudicial para el proceso de obtención del azúcar.

Cuando se imbibie puede apreciarse que solamente la capa superficial del colchón de bagazo es mojada por el jugo o agua añadida, mientras la parte restante no sufre ningún cambio apreciable (Gil, J M, 1998; Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971). A partir de los conocimientos recogidos en la literatura sobre medios porosos (Treybal, 1977) se puede decir que cuanto menor sea la tensión superficial del líquido de imbibición, mayor será la profundidad a que este penetre en el colchón de bagazo y si además tiene baja viscosidad, lo hará en menor tiempo (Gil, J M, 1998). En esta etapa el mayor interés recae sobre la retención estática, ya que el movimiento del fluido de imbibición cesa rápidamente. El colchón de bagazo es un medio poroso formado por un elevado número de capilares que aportan una gran superficie específica, lo que explica su gran poder de retención estática de líquido (Gil, J M, 1998; Hamill, 1972; Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971), que puede llegar a diez veces su peso en fibra, en dependencia del por ciento de

saturación inicial (Gil, J A y cols, 1999; Gil, J M, 1998; Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Spencer y cols, 1974). Es necesario señalar que la cantidad de agua que es capaz de absorber el bagazo para un mismo contenido de fibra depende además, del grado de compresión (Gil, J A y cols, 1999; Gil, J M, 1998).

Actualmente las fábricas de azúcar se centran en el logro de un equilibrio entre la demanda de energía de la fábrica y la energía aportada por el suministro del combustible disponible (generalmente bagazo). Además, pretenden maximizar la recuperación de sacarosa de la caña de azúcar mediante el aumento de la cantidad de agua de imbibición que se aplica siempre que permanezca dentro de un rango permisible. Sin embargo (Peacock y cols, 2009) demuestra que existe un valor óptimo de imbibición con el que se maximizan los ingresos. Si este valor es muy grande se reduce el potencial para la exportación de energía eléctrica del central. Presenta técnicas que se pueden utilizar para determinar el óptimo económico para un típico molino de azúcar basado en el modelado detallado de la planta de extracción (por ejemplo, un difusor) y el balance de energía de la fábrica. En el análisis del efecto de la imbibición en la recuperación de azúcar y exportación de energía encontró un valor óptimo de imbibición con el que se maximizan los ingresos.

La cantidad de agua de imbibición a utilizar para un sistema de extracción por compresión dado depende fundamentalmente de la composición de la caña (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Wienese, 1995). Su uso ha sido estudiado con profundidad por Hugot y Jenkins (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971). Todos concuerdan en utilizar una cantidad de agua de imbibición igual a dos veces la fibra en caña. González (González y cols, 2010) propone que la cantidad de agua de imbibición a utilizar depende de la relación del

precio del azúcar, el precio del combustible y de la composición de la caña, fundamentalmente la fibra.

Se ha verificado experimentalmente y analizado estadísticamente, mediante diseños factoriales, que tanto la temperatura del agua de imbibición y el flujo del agua de imbibición son significativas en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, pero que en mayor medida lo es el flujo de agua de imbibición y que la temperatura solo es efectiva para temperaturas superiores a 70 °C (Castro, O E, 2012) tal y como lo expresa Hugot (Hugot y *cols*, 1986).

Gil (Gil, J M y *cols*, 2011) realizó un estudio sobre el efecto de algunas variables en la demanda de potencia de un tándem cañero. Entre esas variables se encuentra el flujo del agua de imbibición. Los autores demuestran que el consumo de energía del molino estuvo fuertemente afectado por la presión hidráulica aplicada en el molino y no por la imbibición. El flujo del agua de imbibición es una variable de mucha importancia en el proceso de extracción, pero no influye significativamente en la demanda de potencia del tándem.

También se ha estudiado la posibilidad del calentamiento del jugo mezclado mediante el enfriamiento de los condensados que se destinan a emplearse como agua de imbibición. Esta es una operación que, según Valdés (Valdés y *cols*, 2008), permite resultados satisfactorios a la tecnología azucarera, así como poder usar diferentes corrientes de condensados del equipo de evaporación para obtener una temperatura determinada en el agua de imbibición y realizar a la vez el incremento correspondiente de la temperatura del jugo mezclado.

#### **1.4 Reabsorción del jugo en los molinos**

Una parte del jugo se extrae a partir de determinadas zonas de compresión cercanas a la abertura entre las mazas y fluye por el fondo de las ranuras de las mazas en el mismo sentido que el bagazo comprimido. Después del plano axial, el bagazo es capaz de reabsorber parte del jugo (Jenkins, 1971). Los responsables del fenómeno son las fuerzas capilares. En este caso la viscosidad juega un papel muy importante, porque de ella depende la velocidad de flujo del jugo extraído. Mientras mayor sea esta velocidad, menor será la cantidad de fluido reabsorbido por disminuir la cantidad de jugo que fluye en el mismo sentido del bagazo comprimido. Es importante que a este efecto existan estrías limpias en la superficie de las mazas que permitan una rápida evacuación del jugo.

Según Hugot (Hugot y cols, 1986) el factor de reabsorción se define como la relación entre el volumen de bagazo por unidad de tiempo que pasa por la abertura de salida del molino mientras este se encuentra operando, y el volumen descrito por la generatriz de las mazas de salida en esas mismas condiciones, cuando dicha generatriz se multiplica por la velocidad tangencial de las mazas y por la abertura de salida.

Jenkins (Jenkins, 1971) señaló que el volumen de bagazo que sale del molino es mayor que el volumen descrito. Postuló que el jugo se mueve hacia delante a través de la abertura mínima entre las dos mazas a una velocidad mayor que la de la fibra sobre la superficie de las mazas. Bullock (Bullock, 1957) encontró que el coeficiente de fricción del bagazo sobre la superficie de hierro colado de las ranuras disminuye a medida que aumenta la presión y sugiere que el bagazo se deslice hacia delante a través de la abertura mínima entre las mazas. Cullen (Cullen, 1965) demostró que en la región del plano axial, el coeficiente de cizallamiento interno del bagazo es del mismo orden que el

coeficiente de fricción, por lo que este podría extruir a través de la abertura mínima. Solomón (Solomon, 1967) determinó las componentes radiales y tangenciales de las fuerzas sobre un segmento de cilindro. Concluyó que parece imposible que el material se deslice sobre la superficie del cilindro y es más probable que la causa de la reabsorción sea la extrusión del material a través del espacio entre las puntas de las ranuras. Cuando las mazas están demasiado pulidas el factor de reabsorción es alto. Una medida de la reabsorción en el molino la da el coeficiente de reabsorción. En ninguno de los modelos para el coeficiente de reabsorción, que recoge la literatura consultada (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Loughran, 1990; Murry, 1996; Riera, 1996; Sevilla y cols, 1977), aparecen como variables la tensión superficial del jugo y la viscosidad (Gil, J A y cols, 1999).

Sevilla (Sevilla y cols, 1977) propone calcular el coeficiente de reabsorción según la ecuación (1.3):

$$k = \frac{V_b}{V_e} : (\text{Sevilla y cols, 1977}) \text{ donde:} \quad (1.3)$$

$k$  : Coeficiente de reabsorción.

$V_b$  : Volumen del bagazo ( $\text{pie}^3/\text{min}$ ).

$V_e$  : Volumen descrito por el molino ( $\text{pie}^3/\text{min}$ ).

$$V_e = L \cdot S \cdot ADS \text{ donde:} \quad (1.4)$$

$ADS$  : Abertura dinámica de salida ( $\text{pie}$ ).

$S$  : Velocidad lineal periférica de la masa superior ( $\text{pie}/\text{min}$ ).

$L$  : Longitud de los cilindros ( $\text{pie}$ ).

$$V_b = \frac{F_b \cdot m_b}{D_f} + \frac{m_b(1 - F_b)}{D_{jb}} \text{ donde:} \quad (1.5)$$

$F_b$  : Fracción de fibra en peso del bagazo a la salida del molino.

$m_b$  : Flujo del bagazo a la salida del molino (lb/min).

$D_f$  : Densidad de la fibra seca a la salida del molino (lb/pie<sup>3</sup>).

$D_{jb}$  : Densidad del jugo en el bagazo a la salida del molino (lb/pie<sup>3</sup>).

Este método depende fundamentalmente de las propiedades físicas del bagazo (fracción de fibra en peso del bagazo, densidad de la fibra, densidad del jugo en el bagazo). La densidad de la fibra la asume constante cuando esta variable debe variar con el estado técnico del molino, la preparación de la caña y las propiedades del jugo. La densidad del jugo en el bagazo a la salida del molino debe variar con la imbibición (flujo y temperatura del agua), la preparación de la caña y las propiedades del jugo. Este es un método que tiene como inconveniente la gran cantidad de ensayos que hay que realizar en el laboratorio.

Hugot (Hugot y cols, 1986) propone un método donde el coeficiente de reabsorción puede ser calculado según la ecuación (1.6):

$$k = C + 0,017 v + 0,65 \rho \text{ donde:} \quad (1.6)$$

$k$  : Coeficiente de reabsorción.

$C$  : Constante que depende del molino y que asume los siguientes valores.

$C = 0,75$  para un primer molino.

$C = 0,65$  para un segundo molino.

$C = 0,60$  para los siguientes molinos.

$v$  : Velocidad periférica de las mazas en (m/min).

$\rho$  : Densidad de la fibra a la salida del molino ( $\text{kg/dm}^3$ ).

$\rho = (0,38 \text{ a } 0,55)$  para el primer molino.

$\rho = (0,8 \text{ a } 1,0)$  para el último molino.

Este es un método que depende solamente de tres variables, de ellas dos son constantes en cada molino: la constante que depende del molino y la velocidad periférica de las mazas. La otra variable es la densidad de la fibra a la salida del molino. Hugot (Hugot y cols, 1986) propone asumir un valor de esta variable para el primer y el último molino del tándem dentro de un rango recomendado, los valores de los molinos intermedios se calculan mediante una interpolación logarítmica. Al asumir un valor fijo de la densidad a la salida de cada molino se está asumiendo por consiguiente que las tres variables son constantes, por lo que prácticamente Hugot (Hugot y cols, 1986) asume que el coeficiente de reabsorción es constante para cada molino. Sin embargo, se conoce que el coeficiente de reabsorción varía con las propiedades químicas de la caña (Sevilla y cols, 1977), y que durante la zafra se muelen diferentes tipos de cañas, por estas razones este método no es recomendado por este autor para el cálculo del coeficiente de reabsorción.

Según Riera (Riera, 1996), para la simulación de la operación de extracción de un tándem es preciso conocer los coeficientes reabsorción e imbibición de cada molino, ya sea a través de los reportados en la literatura o los obtenidos experimentalmente. En su investigación desarrolló un procedimiento para calcular dichos coeficientes a partir de mediciones experimentales y de datos de operación de los molinos. Comparó los valores de los coeficientes de reabsorción que obtuvo con los reportados por Russell (Russell, 1968) y Murry (Murry, 1965; 1971) obtenidos experimentalmente donde se aprecia coincidencia entre ellos (tabla 1.1). Sin embargo, al comparar sus resultados (Riera,

1996) con los obtenidos por Sevilla (Sevilla, 1982) hubo diferencia, los valores de sus coeficientes no son superiores a dos mientras que los obtenidos por Sevilla (Sevilla, 1982) en la mayoría de los casos sobrepasan este valor (tabla 1.1). Según Riera (Riera, 1996) estos valores deben ser siempre menores a dos, ya que el coeficiente de reabsorción representa la relación entre el volumen de bagazo que pasa en la unidad de tiempo y el volumen que genera la maza en su movimiento, por lo que un valor de coeficiente de reabsorción igual a dos significa que está pasando dos veces el volumen de bagazo, lo que refleja una baja extracción debido a la alta extrusión; a su criterio esta diferencia puede deberse a las aberturas empleadas en los cálculos, sin embargo, el coeficiente de reabsorción también depende del estado técnico de los molinos, estado que se declina a medida que avanza la zafra.

**Tabla 1.1.** Valores de los coeficientes de reabsorción reportados por diferentes autores.

Molinos	Rusell (1968)	Murry (1965)	Murry (1971)	Sevilla (1982)
1	1,30	1,30	1,35	1,935
2	1,31	1,35	1,69	2,275
3	1,38	1,40	1,51	2,580
4	1,43	1,50	1,41	2,949
5				5,616
6				6,165

Fuente: (Riera, 1996)

### 1.5 Ahorro de energía en centrales azucareros

Una de las vías para disminuir los costos del proceso de producción de azúcar crudo de caña es disminuir las pérdidas de sacarosa en bagazo y el consumo de energía en el tándem. En cualquier área de un central azucarero se pueden tomar medidas e investigar con el objetivo de lograr disminuir el consumo de energía siempre y cuando no se afecte la producción. Por ejemplo, Lavarack (Lavarack y cols, 2004) ha investigado sobre la

eficiencia energética en los centrales azucareros en el área de generación de vapor y considera que el área más consumidora de energía de un central es el tándem de molinos. Este consume alrededor del 30 % de la energía utilizada por el central azucarero (Barreiro, 2011; Domínguez *y cols*, 2003; Gómez *y cols*, 2006; Jáuregui *y cols*, 2004; Vélez *y cols*, 2006; Vélez *y cols*, 2005). El empleo de altas presiones hidráulicas en los molinos aumenta el consumo de energía, influye negativamente en la capacidad del molino, aumenta el costo operacional y de mantenimiento, así como la extracción de no azúcares (Barreiro, 2011; Hugot *y cols*, 1986).

El consumo de energía en un tándem de molinos cañeros depende de muchos factores: eléctricos (Rosero, E *y cols*, 2009; Vélez *y cols*, 2006; Vélez *y cols*, 2005), mecánicos (diseño del molino y estado técnico); operacionales (presiones hidráulicas, ajustes de los molinos, nivel de imbibición y temperatura del agua de imbibición, grueso del colchón de bagazo, etc.) (Azaret, A J *y cols*, 2004; Castro, Y R *y cols*, 2004; Hugot *y cols*, 1986; Pérez, E *y cols*, 2004); de las características de la caña que entra al molino (masa, fibra en caña, variedad y preparación), etc. (Hugot *y cols*, 1986).

Se estudió la potencia demandada por el motor que acciona un molino del tándem cuando varían la presión hidráulica, la molida y el nivel de imbibición y se demostró que el consumo de energía estuvo fuertemente afectado por la presión hidráulica (Gil, J M *y cols*, 2011; Nápoles *y cols*, 2006). Existen informes acerca de cómo homogenizar la presión aplicada sobre el colchón de bagazo (Arzola *y cols*, 2007; Espinosa, A M *y cols*, 2011; Goytisolo *y cols*, 2012; Suárez, L D *y cols*, 2005), pero no refieren cómo disminuir la presión hidráulica de trabajo en los molinos para disminuir el consumo de energía sin afectar los por ciento de pol y humedad en el bagazo final.

Se han realizado estudios sobre el tipo de accionamiento que mueve la masa superior y se han obtenido ecuaciones con las que se pueden determinar las cargas dinámicas del molino considerando la flotación de la masa superior y sobre la base de las leyes de movimientos para determinar toda la cinemática del molino que depende de la cinemática del funcionamiento de las coronas (Cabello y cols, 2009; 2011; Mendoza y cols, 2013; Moya y cols, 2011; Rodríguez y cols, 1998). En otras investigaciones se proponen planes de acciones para controlar las pérdidas de sacarosa en el proceso de extracción (Ortiz y cols, 2008). Otros muestran oportunidades de ahorro de energía en los tandems de molinos de caña de azúcar, pero no tienen en cuenta el efecto de la presión hidráulica (Dunn y cols, 2009).

Existen investigaciones donde se presentan expresiones teóricas para el cálculo de la potencia demandada por un molino de caña con accionamiento mecánico y con diferentes alternativas de accionamiento hidráulico, obtenidas sobre la base de un tratamiento más riguroso de las pérdidas en los elementos de la transmisión del molino (Noa y cols, 2007). Se hizo un análisis más riguroso que el presentado por Hugot (Hugot y cols, 1986) de las pérdidas y la potencia total demandada por el molino. Esta fue determinada sumándole a la potencia calculada por Hugot (Hugot y cols, 1986) las pérdidas de potencia en la transmisión (Noa y cols, 2007).

Silva (Silva y cols, 2010) determinó los niveles de consumo de portadores energéticos y su incidencia en el proceso productivo del azúcar crudo de caña mediante la aplicación de las herramientas de la tecnología de gestión total de eficiencia de la energía a partir de datos experimentales. Propone acciones para el incremento de la eficiencia energética en la empresa. Estas acciones se basan fundamentalmente en mejoras en la

instrumentación, el control de la operación, uso de dispositivos de ahorro y mantenimiento.

Lafargue (Lafargue y cols, 2001) estableció experimentalmente, mediante un modelo matemático, la relación entre la velocidad de deslizamiento y la presión específica sobre el coeficiente de fricción en las chumaceras de los molinos de caña de azúcar. La disminución de la velocidad de deslizamiento conduce a un incremento del coeficiente de fricción, disminuye la presión específica y la demanda de potencia friccional en las chumaceras. De acuerdo con lo anterior, entonces es conveniente disminuir la presión hidráulica a aplicar en los molinos del tándem siempre que no se afecte el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar (Corrales y cols, 2013).

Los trabajos realizados en modelado de molinos de caña de azúcar apuntan principalmente a tener un mejor entendimiento del proceso físico para ayudar a la preparación de la caña a ser molida y determinar la configuración óptima del molino para maximizar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar (Loughran, 1990; Murry y cols, 1967). Estos modelos son complejos, usualmente estáticos, no lineales y contienen muchos parámetros que no se pueden determinar fácilmente en forma directa. Rosero y Gonzalo (Gonzalo y cols, 2008; Rosero, E y cols, 2009; Rosero, E E, 2006) presentan un modelado dinámico no lineal a partir de principios físicos de molinos de caña de azúcar de cuatro mazas accionados con motores eléctricos, con el objetivo de maximizar la extracción.

Jáuregui y Vélez (Jáuregui y cols, 2004; Vélez y cols, 2006; Vélez y cols, 2005) presentan modelos matemáticos que permiten determinar las demandas de la potencia mecánica y consumo de energía eléctrica en tándems de molinos para el proceso de extracción de

la sacarosa de la caña de azúcar. Ellos analizan dos variantes de accionamiento en el tándem: la primera con transmisión mecánica y un motor eléctrico como accionamiento y la segunda una transmisión hidráulica con igual tipo de accionamiento. Su propuesta es monitorear la operación de la transmisión para ser eficiente energéticamente desde ese punto de vista, pero no consideran la posibilidad de reducir la presión hidráulica a aplicar en los molinos del tándem (Jáuregui y cols, 2004; Vélez y cols, 2005).

En Colombia el diseño de los molinos ha permanecido relativamente estable por casi dos siglos, manteniendo el principio de aplicar grandes presiones a bajas velocidades de rotación en las mazas superiores de los molinos del tándem para mejorar el proceso de extracción (Jairo y cols, 2004). Estas presiones son aplicadas a través de actuadores óleo-neumáticos en las chumaceras de los ejes de maza superior creando efectos mecánicos (esfuerzos y desgaste) sobre todos los componentes. Aun así, protegen la idea de mantener aplicadas altas presiones a costa de todos los problemas que presentan las chumaceras (Jairo y cols, 2004), ignorando que a partir de ciertos valores no aumenta la extracción y si el consumo de energía del tándem (Hugot y cols, 1986). Más bien basan sus investigaciones en cómo reparar y evitar el desgaste de las mazas de los molinos por el par tribológico acero-bagazo (David y cols, 2013; Oliver y cols, 2007).

Casanova (Casanova y cols, 2008) realizó estudios acerca de la incidencia de la aplicación de las presiones sobre el desgaste de las mazas de los molinos. En general, los resultados mostraron que, independientemente de la composición del material de la maza, cuando mayor es la presión hidráulica que se aplica en la maza superior es mayor la presión entre la superficie de contacto de las mazas y el bagazo, lo que propicia la rotura del rayado de las mazas.

## 1.6 Demanda de potencia del tándem de molinos

Pérez (Pérez, E, 2003) señala que el aspecto más importante en los cálculos de la demanda de potencia de un molino no es la precisión de una u otra expresión de cálculo en comparación con los valores determinados por instrumentos en el transcurso de la operación del equipo. Aunque este aspecto no deja de ser importante, lo más importante es la relación entre el comportamiento de la demanda de potencia y el de factores operativos importantes como la velocidad, el ajuste (setting), las presiones hidráulicas y la correlación entre estos elementos y la demanda específica de potencia en relación con la caña molida y la fibra procesada por el molino, así como la eficiencia del equipo.

Pérez (Pérez, E, 2003) desarrolló un método partiendo de la ecuación planteada por Hugot (Hugot y *co/s*, 1986) que tiene en cuenta la situación más generalizada actualmente en el funcionamiento de un molino para el caso específico de Cuba que es la utilización de motores independientes para el movimiento de los conductores intermedios, esta decisión se ha tomado con vistas a hacer más flexible la operación de este conductor (Pérez, E, 2003). Con esto se hace necesario restar el valor de la potencia demandada por el movimiento de los conductores intermedios de la total que demanda el equipo motriz que mueve el molino, pues aunque esta potencia se sigue demandando, ya no se puede tener en cuenta como carga del motor principal (Pérez, E, 2003). También se ha generalizado el empleo de la cuarta maza o alimentador forzado en el molino, la cual recibe el movimiento desde la maza superior a través de una corona habilitada al efecto.

Pérez (Pérez, E, 2003) agregó a la ecuación propuesta por Hugot (Hugot y *co/s*, 1986) la demanda de potencia que requiere la cuarta maza y eliminó la demanda de potencia

requerida por el movimiento de los conductores intermedios y obtuvo una ecuación adaptada específicamente a las condiciones de los centrales de Cuba (1.7).

$$N = \frac{nD}{1,34\eta} \left\{ F \left[ 0,4 \frac{6k-5}{\sqrt{k}(1+\sqrt{k-1})} \cdot \sqrt{\varepsilon_A} + 0,063 \right] + 1,5L \right\} \text{ donde:} \quad (1.7)$$

$F$  : Fuerza hidráulica total aplicada ( $t_{cortas}$ ).

$n$  : Velocidad de rotación de la masa superior (rpm).

$D$  : Diámetro promedio de los diámetros medios de las mazas (m).

$\eta$  : Eficiencia de la transmisión.

$\varepsilon_A$  : Abertura específica de salida.

$k$  : Coeficiente de reabsorción.

$L$  : Longitud de las mazas (m).

Esta ecuación es la más completa ya que tiene en cuenta elementos que influyen a la vez sobre la extracción y la demanda de potencia como son los ajustes del molino y el coeficiente de reabsorción.

### 1.7 Conclusiones parciales

1. Hay que considerar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar como un proceso combinado de lixiviación-compresión, y no solo de extracción del jugo por compresión.
2. Aunque en la literatura se reportan diversos modelos con distintos grados de complejidad que describen el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, en ninguno se puede derivar cómo racionalizar los valores de la presión

hidráulica a aplicar en los molinos del tándem sin afectar los por ciento de pol y humedad en el bagazo final.

3. Existe el criterio generalizado de que la aplicación de altas presiones hidráulicas en los molinos, favorece el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar.
4. No existe un procedimiento para determinar las presiones hidráulicas a aplicar en el tándem, que tenga en cuenta el estado técnico de los molinos y las condiciones reales de operación del mismo.

## **CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Técnicas de laboratorio**

Las técnicas de laboratorio utilizadas para la determinación de los por cientos de fibra, por ciento de pol y por ciento de humedad fueron las establecidas como directivas por la dirección de calidad del grupo AZCUBA y recogidas en el documento oficial conocido como Manual de Análisis y Control Unificado (Sanfiel y *cols*, 2004).

### **2.2 Determinación del tiempo de retención del bagazo en el tándem**

Se marcó la caña preparada añadiendo cal sobre el colchón de bagazo en la entrada del primer molino del tándem, el bagazo adquiere un color amarillo verdoso. Se midió el tiempo que permaneció desde que entró al primer molino hasta que salió por el sexto.

### **2.3 Estudio del efecto de la preparación de la caña sobre el % pol y % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem**

El tándem de molinos tiene una capacidad de molienda de 9 200 t/día (800 000 @/día), está compuesto por seis molinos de tres mazas con cuarta maza o maza alimentadora y tiene tolva alimentadora Donnelly en todos los molinos. Se analizan como variables dependientes: por ciento de pol, por ciento de humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem, como variable independiente el índice de preparación de la caña.

Los valores de todas las variables se tomaron de los reportes diarios del laboratorio azucarero y la demanda de potencia del tándem por medio de un analizador de redes instalado en la planta eléctrica.

Los análisis se realizaron en dos etapas, una primera etapa donde se operó el tándem con dos juegos de cuchillas y una segunda etapa donde se operó con tres juegos de cuchillas. El método estadístico utilizado en esta investigación fue una comparación de dos muestras independientes mediante prueba de hipótesis, con el objetivo de identificar si existe diferencia significativa entre las variables dependientes al trabajar con diferentes índices de preparación de la caña, el estadístico utilizado es la t de Student.

Los primeros 32 días de la zafra se preparó la caña con dos juegos de cuchillas hasta que se logró poner en marcha el tercer juego de cuchilla. Después de la instalación de este se operó durante 58 días. Los últimos 24 días de la zafra se trabajó nuevamente con dos juegos de cuchillas, ya que por problemas mecánicos quedó fuera de servicio el que se había instalado.

En la investigación, la hipótesis nula se plantea como la igualdad entre las medias ( $\text{media}_2$  (con dos juegos de cuchillas) =  $\text{media}_3$  (con tres juegos de cuchillas)) contra una hipótesis alterna que refiere la desigualdad entre las medias ( $\text{media}_2 \neq \text{media}_3$ ). El índice de preparación de la caña promedio con dos juegos de cuchillas fue de 60,11 % y con tres juegos de cuchillas 74,03 %. Para analizar si existe diferencia significativa entre las variables dependientes (por ciento de pol, por ciento de humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem) al trabajar con diferentes índices de preparación de la caña se tomó el nivel de confianza del 95 %.

## **2.4 Diseño factorial para el estudio del efecto de la imbibición sobre el % pol y % humedad del bagazo final a escala industrial**

El método estadístico utilizado en esta investigación fue un diseño factorial completo  $2^2$ , diseñado y analizado con el software STATGRAPHICS Plus 5.1. Este diseño tuvo en cuenta dos variables independientes: temperatura del agua de imbibición y flujo del agua de imbibición, con dos variables dependientes: por ciento de pol y por ciento de humedad del bagazo residual, a dos niveles de presencia y dos experimentos en el nivel central para el estimado de la varianza (tabla 2.1). En el modelo se tomó el nivel de significación  $\alpha=0,05$ .

### **Variables controladas:**

Molida promedio 384 t/h.

Materias extrañas promedio 10 %.

Fibra en caña promedio 16 %.

Presiones hidráulicas en los molinos uno y seis 19,3 MPa.

Presiones hidráulicas en los molinos dos y cinco 17,9 MPa.

Presiones hidráulicas en los molinos tres y cuatro 16,5 MPa.

El nivel alto de temperatura se estableció en 75 °C porque a valores superiores comienza la extracción de los no azúcares y el deslizamiento del bagazo sobre la superficie de los molinos. El nivel bajo en 37 °C porque fue la temperatura mínima que se logró en el agua de imbibición. Los niveles del flujo se establecieron de acuerdo a las condiciones reales de operación del sistema de imbibición (tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Variables independientes y sus niveles de presencia

Variables	Nivel bajo (-1)	Nivel central (0)	Nivel alto (+1)
Temperatura de imbibición (°C)	37	56	75
Flujo de imbibición (t/h)	50	63	76

Los experimentos fueron realizados al azar según la matriz generada por el software y para disminuir el error se realizaron en dos bloques (tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Matriz de los experimentos

No	Bloque	Temperatura de imbibición	Flujo de imbibición
1	1	1	-1
2	1	-1	-1
3	1	-1	1
4	1	0	0
5	1	1	1
6	1	0	0
7	2	1	-1
8	2	-1	-1
9	2	-1	1
10	2	0	0
11	2	1	1
12	2	0	0

#### 2.4.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos

Se varió la temperatura y el flujo del agua de imbibición según el diseño factorial, esperando como mínimo tres minutos para que el tándem se ajustara a las nuevas condiciones de trabajo (dos minutos es el tiempo de retención del bagazo en el tándem). Luego se tomó una muestra del bagazo final a la salida del tándem. El bagazo fue muestreado a todo lo ancho del colchón, formando una muestra acumulativa de cinco kilogramos durante un tiempo de cinco minutos. Cada muestra fue guardada en una bolsa plástica y herméticamente cerrada. Finalmente, se le realizó a la muestra de bagazo los ensayos de por ciento de pol y por ciento de humedad. La muestra fue homogenizada y reducida por el método de paladas alternas (Burmístrova, 1977).

## **2.5 Estudio del proceso de lixiviación en tándem de molinos**

Este proceso ha sido insuficientemente estudiado como tal, ya que no se han encontrado publicaciones acerca de cómo se manifiesta el proceso de transferencia de masa de la sacarosa de la caña de azúcar desde el bagazo hasta el jugo mezclado, a pesar de que existen publicaciones sobre el proceso de imbibición (González y cols, 2010; Hugot y cols, 1986; Peacock y cols, 2009; Riera, 1996; Sevilla y cols, 1977) constituye una novedad el procedimiento para evaluar el proceso de lixiviación en la extracción de azúcar en tándem de molinos en la industria azucarera.

La investigación se realizó en el tándem de molinos cañeros del central Majibacoa. Este tiene una capacidad de molienda de 6 900 t/día (600 000 @/día). Está compuesto por seis molinos de tres mazas con cuarta maza o maza alimentadora y tiene tolva alimentadora Donnelly en todos los molinos. La caña muestreada en la investigación llegó por ferrocarril procedente de los centros de acopio y en carros por tiro directo.

El primer molino del tándem (extrae aproximadamente el 70 % de la extracción del tándem (Barreiro, 2011; Jenkins, 1971)) es el encargado de suministrar el alimento (bagazo) a la etapa de extracción en húmedo.

### **2.5.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.**

Se marcó la caña con cal a la entrada del primer molino. Luego se tomó una muestra de bagazo a la salida de cada molino que interviene en el proceso de extracción en húmedo (exactamente en el momento en que se encuentra pasando por él la caña marcada con cal). El bagazo fue muestreado a todo lo ancho del colchón. Cada muestra se guardó en una bolsa plástica herméticamente cerrada, se homogenizó y fue reducida por el método de paladas alternas (Burmístrova, 1977). El tamaño de la muestra a experimentar fue de

200 g. La muestra de bagazo se comprimió en la prensa del laboratorio para extraerle el jugo que fue posible, se determinó la masa del jugo y la masa de la torta de bagazo prensada (la suma de ellos dos son los 200 g de la muestra). Al jugo se le determinó el Brix en el laboratorio. La torta de bagazo prensada se secó hasta llevar a peso constante y se le determinó la masa a la torta seca de bagazo obtenida y se calculó la masa de líquido retenido en la torta de bagazo prensada (masa de torta de bagazo prensado menos la masa de la torta seca).

**Variables controladas:**

Molida promedio 287,5 t/h.

Fibra en caña promedio 15,4 %.

Presiones hidráulicas en los molinos uno y seis 17,9 MPa.

Presiones hidráulicas en los molinos dos y tres 16,5 MPa.

Presión hidráulica en el molino cuatro 15,9 MPa.

Presión hidráulica en el molino cinco 15,2 MPa.

**2.6 Determinación experimental de la abertura del plano neutral entra la maza superior y la bagacera**

Como se planteó en el capítulo anterior la abertura del plano neutral es un factor muy importante a tener en cuenta en el cálculo del ajuste de los molinos, pues a partir de ese plano comienza el proceso de extrusión (Jenkins, 1971; Loughran, 1990).

Después de ser sometido el bagazo al proceso de compresión en el molino, se toma una muestra y se lleva a la prensa del laboratorio. Se comprime lentamente hasta que aparezca la primera gota de jugo, y se determina el espesor de ese colchón de bagazo, ese espesor es el equivalente a la abertura hasta la cual se produce una compresión útil,

ya que a partir de ella no hay extracción en el molino. Por tanto, conceptualmente ese espesor determinado de manera experimental es el equivalente a la abertura del plano neutral, a partir del cual comienza el proceso de extrusión (Jenkins, 1971; Murry, 1996). En el molino existen dos aberturas de plano neutral, una entre la maza superior y la maza cañera y otra entre la maza superior y la maza bagacera. Para determinar la abertura del plano neutral entre la maza superior y la maza cañera es muy complejo tomar la muestra de bagazo debido a la presencia de la cuchilla y las altas presiones que en esa región existen.

A continuación, se propone un procedimiento experimental para determinar la abertura del plano neutral entre la maza superior y la maza bagacera.

### **2.6.1 Procedimiento experimental para determinar la abertura del plano neutral del molino**

1. Medir la altura del colchón de bagazo con una vara graduada de tope movable. Dicho tope se desliza hacia arriba (al introducirla verticalmente en el colchón de bagazo hasta topar la estera) en la misma magnitud que tiene la altura del colchón de bagazo. Esta operación se realiza varias veces en los extremos y centro del conductor de bagazo para obtener un valor promedio de la altura del colchón de bagazo.
2. Tomar muestra de bagazo en cada molino. El bagazo fue muestreado a todo lo ancho del colchón en cada molino, formando una muestra acumulativa de cinco kilogramos de bagazo durante un tiempo de cinco minutos. Cada muestra de bagazo fue guardada en una bolsa plástica y cerrada herméticamente.
3. Masa de bagazo a utilizar. La masa de bagazo a emplear en los experimentos, deberá ser similar a la de bagazo suelto contenida en un cilindro imaginario de altura igual a

la del colchón de bagazo sobre el conductor y diámetro igual al del cilindro empleado para prensar el bagazo en la prensa del laboratorio azucarero. Para aproximarse a ese modelo, se construyó un cilindro rígido (A) de altura igual al promedio de las descritas en el paso uno y diámetro igual al del cilindro que se utiliza para comprimir las muestras de bagazo en la prensa del laboratorio. La masa de bagazo suelto que puede contener este cilindro será introducida de una vez en el cilindro con que se realizan los prensados en la prensa del laboratorio (Gil, J M, 2011).

4. Reducir el tamaño de la muestra de bagazo por el método de paladas alternas (Burmistrova, 1977).
5. Llenar con bagazo el cilindro (A).
6. Pesar la masa contenida en el cilindro.
7. Depositar la masa de bagazo obtenida en el paso seis, en el cilindro de la prensa del laboratorio para compresión.
8. Colocar una escala milimetrada sobre el vástago del pistón que ejerce presión sobre el bagazo contenido en el cilindro que contiene el bagazo. El valor cero de la escala debe situarse en la base del cabo del pistón (Fig. 2.1).
9. Aplicar presión para comprimir lentamente al bagazo hasta que comience a salir la primera gota de jugo por los orificios del cilindro (Gil, J M, 2011; Sanfiel y cols, 2004).
10. En ese instante tomar la lectura del desplazamiento del pistón.
11. Calcular la abertura del plano neutral a partir de los datos experimentales según la ecuación (2.1).

$$Apn = H - (s + l) \quad (2.1)$$

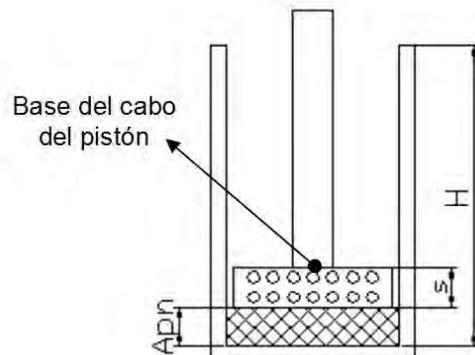
donde (Fig. 2.1):

$A_{pn}$ : Abertura del plano neutral experimental (m).

$H$ : Altura del cilindro ( $1,59 \times 10^{-1}$  m).

$l$ : Lectura del desplazamiento del pistón a la aparición de la primera gota de jugo (m).

$s$ : Espesor de la base del pistón ( $3,6 \times 10^{-2}$  m).



**Fig. 2.1.** Esquema del cilindro-pistón donde se comprime el bagazo.

12. Repetir este procedimiento para cada molino.

## 2.7 Determinación experimental del coeficiente de reabsorción

Se conoce que el coeficiente de reabsorción es la relación entre el volumen de bagazo que sale del molino y el volumen descrito por el molino (Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971; Murry, 1996), por tal motivo siempre será mayor que la unidad. En el proceso de compresión del bagazo en el molino existe un plano (plano neutral) donde cesa la extracción de jugo y a partir del cual comienza el proceso de extrusión hasta el plano axial (abertura dinámica de salida) (Jenkins, 1971; Murry, 1996).

### 2.7.1 Procedimiento para la determinación del coeficiente de reabsorción

1. Obtener de la dirección del área de molienda los valores de las aberturas dinámicas de salida de los molinos.
2. Determinar la abertura del plano neutral según el procedimiento expuesto en el

epígrafe 2.6.1.

3. Determinar el coeficiente de reabsorción según la ecuación (2.2):

$$k = \frac{A_{pn}}{ADS} \text{ donde:} \quad (2.2)$$

$A_{pn}$ : Abertura del plano neutral (espesor de saturación) (m).

$ADS$ : Abertura dinámica de salida (m).

### **2.8 Procedimiento para la aplicación de la investigación en tándem de molinos cañeros**

1. Disminuir las presiones hidráulicas en los molinos intermedios del tándem.
2. Determinar la abertura del plano neutral experimental por el procedimiento propuesto en el epígrafe 2.6.1 para cada molino intermedio.
3. Determinar el coeficiente de reabsorción por el procedimiento propuesto en el epígrafe 2.7.1 para cada molino intermedio.

El coeficiente de reabsorción debe ser como mínimo igual a la unidad, por tanto, al obtener el resultado si es mayor que uno volvemos a aplicar este procedimiento, o sea, de manera iterativa hasta lograr que se aproxime a la unidad.

### **2.9 Diseño factorial $2^k$ para el estudio del efecto de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios sobre el % pol, % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem**

El método de muestreo utilizado en esta investigación para determinar las magnitudes de las variables dependientes (por ciento de pol y por ciento de humedad en el bagazo final) fue, según un diseño factorial completo  $2^4$ . Se utilizan sistemas mecánicos que garantizan la representatividad de las muestras y estas fueron recolectadas en el proceso mediante

el muestreo aleatorio de bagazo. Los datos experimentales fueron procesados con el software STATGRAPHICS Plus 5.1. En el modelo se tomó un nivel de significación  $\alpha=0,05$ .

La caña empleada en la investigación llegó por ferrocarril procedente de los centros de acopio y en carros por tiro directo. Para los experimentos, los carros con la caña fueron seleccionados al azar en el basculador.

Los experimentos se realizaron en dos etapas: una preparando la caña con dos juegos de cuchillas y otra con tres juegos de cuchillas. En ambos casos fue disminuida la presión hidráulica en los molinos intermedios en 3,45 MPa (500 PSI) respecto la presión hidráulica de trabajo establecida en el tándem.

En el diseño se consideraron tres variables dependientes: por ciento de pol, por ciento de humedad del bagazo final y la demanda de potencia del tándem, con cuatro variables independientes, presión hidráulica de los molinos intermedios: dos, tres, cuatro y cinco a dos niveles de presencia y cinco experimentos en el nivel central para el estimado de la varianza (tabla 2.3).

### **Variables controladas**

Molida promedio 384 t/h.

Materias extrañas promedio 10 %.

Fibra en caña promedio 16 %.

Temperatura del agua de imbibición 70 °C.

Preparación de la caña con dos juegos de cuchilla 60 %.

Preparación de la caña con tres juegos de cuchillas 74 %.

Nivel de imbibición  $M_{\text{agua}}/M_{\text{fibra en caña}}=2$ .

Presiones hidráulicas en los molinos uno y seis 19,3 MPa.

Los niveles altos de las variables independientes coinciden con los valores reales de operación establecidos por el central azucarero. Los niveles bajo son los valores a los que se pudo llegar debido a que existe el criterio de que el empleo de las altas presiones favorece el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar (tabla 2.3).

**Tabla 2.3.** Variables independientes y sus niveles de presencia

Molino	Presión hidráulica, MPa		
	Nivel bajo (-1)	Nivel central (0)	Nivel alto (+1). Presión de trabajo establecida en el tándem por molino
Molino 2	14,5	16,2	17,9
Molino 3	13,1	14,8	16,5
Molino 4	13,1	14,8	16,5
Molino 5	14,5	16,2	17,9

Los experimentos fueron realizados al azar según la matriz generada por el STATGRAPHICS Plus 5.1 y en dos bloques para disminuir el error, solo se representa un bloque, (tabla 2.4).

**Tabla 2.4.** Matriz de los experimentos

No	Bloque	Molino 2	Molino 3	Molino 4	Molino 5
1	1	1	1	1	-1
2	1	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	1	1	1
6	1	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	1	1
8	1	-1	-1	1	1
9	1	-1	1	1	-1
10	1	0	0	0	0
11	1	1	1	1	1
12	1	-1	-1	1	-1
13	1	0	0	0	0
14	1	-1	-1	-1	-1
15	1	-1	-1	-1	1
16	1	1	-1	-1	1

17	1	0	0	0	0
18	1	-1	1	-1	-1
19	1	0	0	0	0
20	1	1	1	-1	1
21	1	0	0	0	0

### 2.9.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos

Se marcó la caña con cal a la entrada del primer molino y se midió el tiempo que permanece en el tándem. Esto tuvo como objetivo conocer el tiempo de retención de la caña en el tándem para luego de los cambios experimentales, dejar transcurrir un tiempo mayor que ese para que se ajustara a las nuevas condiciones de trabajo antes de tomar las muestras. Luego se fijó el flujo del agua de imbibición teniendo en cuenta la relación  $M_{\text{agua}}/M_{\text{fibra en caña}}=2$  y la temperatura en 70 °C. Posterior a esto se variaron las presiones hidráulicas en los molinos intermedios (dos, tres, cuatro y cinco) según el diseño factorial. Para tomar la muestra de bagazo a la salida del tándem se esperó cinco minutos como mínimo para que el tándem se ajustara a las nuevas condiciones de trabajo. El bagazo fue muestreado a todo lo ancho del colchón, formando una muestra acumulativa de cinco kilogramos de bagazo durante un tiempo de cinco minutos. Cada muestra se guardó en una bolsa plástica herméticamente cerrada, se homogenizó y fue reducida por el método de paladas alternas (Burmístrova, 1977). Seguido de esto se tomó la lectura de la potencia demandada por el motor de cada molino en el analizador de redes y se realizó los ensayos de por ciento pol y por ciento de humedad a la muestra de bagazo en el laboratorio.

## 2.10 Diseño en bloque al azar para la evaluación industrial del efecto de la disminución de presión en los molinos intermedios del tándem

La investigación se realizó en dos tándems de molinos cañeros de centrales diferentes con una capacidad de molienda: el central “Antonio Guiteras Holmes” de 9 200 t/día (800 000 @/día) y el central “Majibacoa” de 6 900 t/día (600 000 @/día). Ambos tándems están compuestos por seis molinos de tres mazas, con cuarta maza o maza alimentadora y tolva alimentadora Donnelly en todos los molinos.

El trabajo experimental se desarrolló sobre la base de un diseño estadístico de experimentos en bloques aleatorizados (Box y *cols*, 1978). Se emplearon dos tratamientos:  $P_i$  y  $P_i - \Delta P$ . Donde  $P_i$  fue la presión hidráulica de trabajo (PT) establecida en cada central azucarero para ser aplicada en cada uno de los  $i$  molinos de extracción en húmedo ( $i=2$  a  $i=5$ ) del tándem cañero.  $P_i - \Delta P$  fue la presión hidráulica experimental (PE). Donde la caída de presión  $\Delta P$  fue de 3,45 MPa (500 PSI) para el tándem 1 (tabla 2.5) y de 2,07 MPa (300 PSI) para el tándem 2 (tabla 2.5).

**Tabla 2.5.** Presiones a las que se desarrolló el experimento

Molinos	Presión hidráulica, MPa			
	Antonio Guiteras		Majibacoa	
	PT	PE	PT	PE
Molino 1	19,30	19,30	13,80	13,80
Molino 2	17,90	14,45	16,50	14,43
Molino 3	16,50	13,05	16,50	14,43
Molino 4	16,50	13,05	16,90	14,83
Molino 5	17,90	14,45	17,20	15,13
Molino 6	19,30	19,30	17,20	17,20

PT: presión hidráulica de trabajo.

PE: presión hidráulica experimental.

Se tomaron como bloques intervalos de dos horas de trabajo del tándem y de ellos, uno para cada tratamiento. En cada central azucarero se realizaron los experimentos a la

misma hora, pero en distintos días, considerando que otras variables no controladas y la hora en que se realizaron los experimentos pudieran influir en los resultados. La aplicación de las presiones PT y PE se distribuyeron de forma aleatoria en los bloques. El diseño experimental quedó compuesto por nueve bloques, con dos tratamientos por bloque (tabla 2.6). Se consideraron como variables dependientes los por ciento de pol y por ciento de humedad en el bagazo final.

### **Variables controladas**

Nivel de imbibición (masa de agua/masa de fibra en caña=2).

Temperatura del agua de imbibición 70 °C.

Presiones en el primer y último molino de cada tándem (tabla 2.6).

**Tabla 2.6.** Diseño estadístico de experimentos en bloques aleatorizados.

No.	Bloques	Tratamientos	
	Hora	1	2
1	6:00 am – 8:00 am	PE	PT
2	8:00 am – 10:00 am	PE	PT
3	10:00 am – 12:00 m	PT	PE
4	12:00 m - 2:00 pm	PE	PT
5	2:00 pm - 4:00 pm	PT	PE
6	4:00 pm - 6:00 pm	PT	PE
7	10:00 pm – 12:00 am	PE	PT
8	12:00 am – 2:00 am	PT	PE
9	2:00 am – 4:00 am	PT	PE

#### **2.10.1 Procedimiento para el desarrollo de los experimentos**

Se determinó el tiempo de retención de la caña en el tándem de molinos. Luego se ajustó las presiones hidráulicas de los molinos del tándem a las condiciones de operación según el diseño en bloques aleatorizados (tabla 2.6). Se tomó la muestra acumulativa de bagazo (Gil, J M, 2011) a la salida del tándem esperando un tiempo igual al de retención de la caña con el objetivo de que se ajustara a las nuevas condiciones de trabajo, antes de

comenzar a tomar la muestra. El bagazo fue muestreado a todo lo ancho del colchón empleando el toma muestras del tándem. Se conformó una muestra acumulativa de cinco kilogramos de bagazo y se guardó en una bolsa plástica herméticamente cerrada para evitar las pérdidas de humedad durante su traslado al laboratorio. En el laboratorio la muestra se homogenizó y redujo de tamaño por el método de paladas alternas (Burmístrova, 1977), para conformar dos muestras (una medición y la réplica). Concluido esto se determinó los por cientos de pol y humedad del bagazo final a las muestras de bagazo, según el procedimiento establecido en el laboratorio azucarero (Sanfiel y cols, 2004).

Para determinar el efecto de los tratamientos y de la posible influencia de los bloques sobre los resultados, los datos experimentales fueron examinados mediante un Análisis de Varianza de Clasificación Doble (Box y cols, 1978) para analizar el efecto de los tratamientos y de la posible influencia de los bloques sobre los resultados para un nivel de confianza del 95 %.

## **2.11 Indicadores de ahorro como resultado de la investigación**

### **2.11.1 Procedimiento para el cálculo del ahorro de energía en el tándem**

La disminución en la demanda de potencia por molino implica un ahorro de energía. Para el cálculo de la demanda de potencia de los molinos del tándem se empleó la ecuación (1.7) propuesta por Pérez (Pérez, E, 2003). Es una de las más completas por incluir en las variables al coeficiente de reabsorción.

Para el caso específico que se analiza los cálculos del ahorro de energía se basaron en 100 días de zafra. Se empleó la ecuación (2.3):

$$Ae = \left( \sum_{i=1}^6 N_{tra,i} - \sum_{i=1}^6 N_{exp,i} \right) * 100 \frac{\text{día}}{\text{zafra}} * 24 \frac{h}{\text{día}} \quad (2.3)$$

donde:

$Ae$ : Ahorro de energía de cada tándem (kWh/zafra).

$\sum_{i=1}^6 N_{tra,i}$ : Potencia demandada por el tándem a las presiones de trabajo (kW).

$\sum_{i=1}^6 N_{exp,i}$ : Potencia demandada por el tándem a las presiones experimentales (kW).

### 2.11.2 Procedimiento para el cálculo del incremento monetario

La energía generada se vende al sistema electroenergético nacional en tres horarios (madrugada, día y pico). Como promedio en el horario de la madrugada se vende a 0,100 \$/kWh, en el horario del día a 0,143 \$/kWh y en el horario pico a 0,274 \$/kWh. Se asumió que el ahorro de energía se obtuvo equitativamente en los tres horarios.

### 2.12 Conclusiones parciales

1. Se propone un procedimiento para el estudio del proceso de lixiviación en tándem de molinos que permite conocer el comportamiento del sistema de imbibición en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar.
2. Se propone un procedimiento experimental para la determinación de la abertura del plano neutral entre la maza superior y la maza bagacera, que implícitamente tiene en cuenta las condiciones reales de operación y estado técnico de los molinos.
3. Se propone un procedimiento experimental para la determinación del coeficiente de reabsorción, basado en la determinación experimental de la abertura del plano neutral entre la maza superior y la maza bagacera que tiene en cuenta las condiciones reales de operación y estado técnico de los molinos.

## **CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Este capítulo aborda los resultados experimentales y su discusión. La aplicación práctica de la investigación se llevó a cabo en dos centrales de la Provincia Las Tunas: el Antonio Guiteras Holmes y el Majibacoa.

#### **3.1 Pruebas de hipótesis para el estudio del efecto de la preparación de la caña sobre el % pol, % humedad del bagazo residual y demanda de potencia del tándem**

Durante la zafra se molió 56 días con dos juegos de cuchillas (los primeros 32 y los últimos 24) y 58 días con tres juegos de cuchillas (está establecido por el central preparar la caña con tres juegos de cuchillas), todos los valores de sesgo estandarizado y curtosis estandarizado se encuentran dentro del rango de -2 a 2 para cada variable dependiente (tabla 3.1), lo que indica que los valores de las variables dependientes siguieron una distribución normal, los valores de las variables se muestran en los anexos 1 y 2. Este estudio se realizó en el central Antonio Guiteras Holmes.

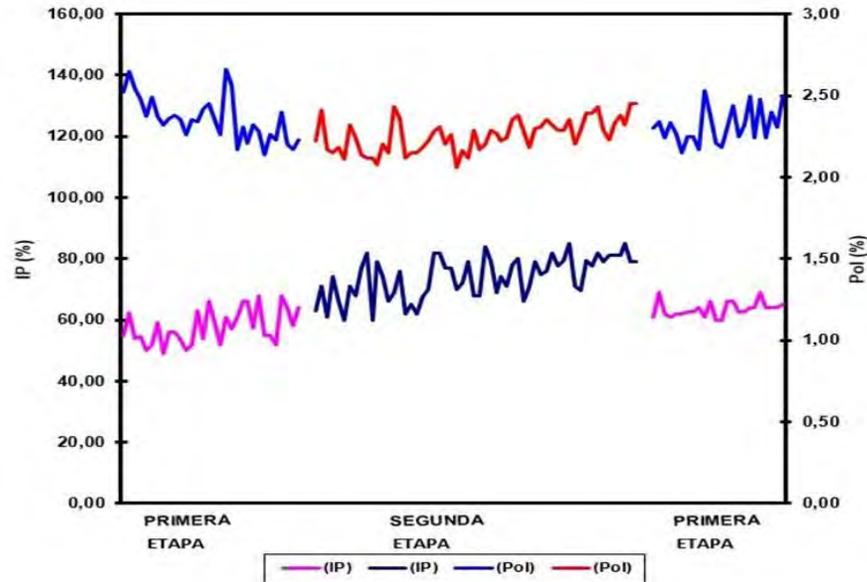
**Tabla 3.1.** Valores de los parámetros estadísticos obtenidos en la comparación de las muestras.

	Pol (%)		Humedad (%)		Demanda de potencia (MW)	
	Juegos de cuchillas		Juegos de cuchillas		Juegos de cuchillas	
	Dos	Tres	Dos	Tres	Dos	Tres
Recuento	56	58	56	58	56	58
Promedio	2,339	2,255	51,130	50,335	2,951	2,869
Desviación Estándar	0,125	0,100	0,900	0,640	0,074	0,071
Mínimo	2,14	2,06	49,7	49,27	2,81	2,71
Máximo	2,66	2,45	52,9	51,8	3,08	3,01
Sesgo Estandarizado	1,927	0,347	0,390	1,611	-0,348	1,560
Curtosis Estandarizada	-0,175	-1,372	-1,850	-0,822	-1,810	-0,904

### 3.1.1 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre el % pol en bagazo final

Para la preparación de la caña con dos juegos de cuchillas los valores de los por ciento de pol en bagazo se encontraron entre 2,14 % a 2,66 % (Fig. 3.1). La inclusión de un tercer juego de cuchillas provocó un considerable aumento del índice de preparación de la caña, influyendo en una disminución de los por ciento de pol a valores dentro de un rango de 2,06 % a 2,45 % (Fig. 3.1). En los últimos 24 días de zafra el índice de preparación disminuyó nuevamente, coincidiendo con un aumento de los por ciento de pol en bagazo a valores dentro del rango de los primeros días de zafra (Fig. 3.1). Se observa (Fig. 3.1) que, para los últimos días de molienda con los tres juegos de cuchillas, la tendencia de los por ciento de pol fue de un ligero aumento, esto estuvo dado por problemas de operación de los molinos. El intervalo de confianza para la diferencia entre las medias se extiende desde 0,041 hasta 0,125. Puesto que el intervalo no contiene el valor cero, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos

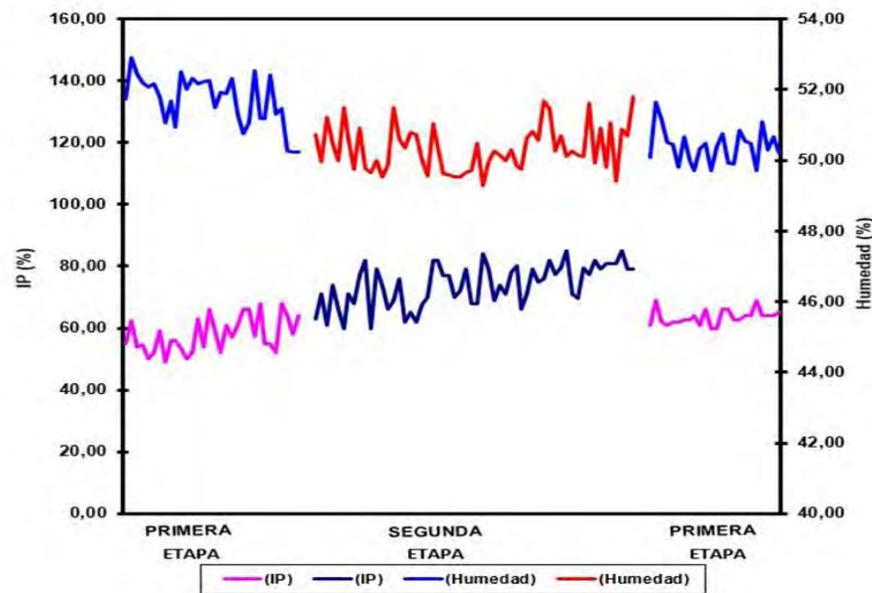
muestras para un nivel de confianza del 95 %. Este resultado indica que el por ciento de pol en bagazo final depende fuertemente de la preparación de la caña.



**Fig. 3.1.** Comportamiento del índice de preparación de la caña sobre el % pol en bagazo final.

### 3.1.2 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre el % humedad en bagazo final

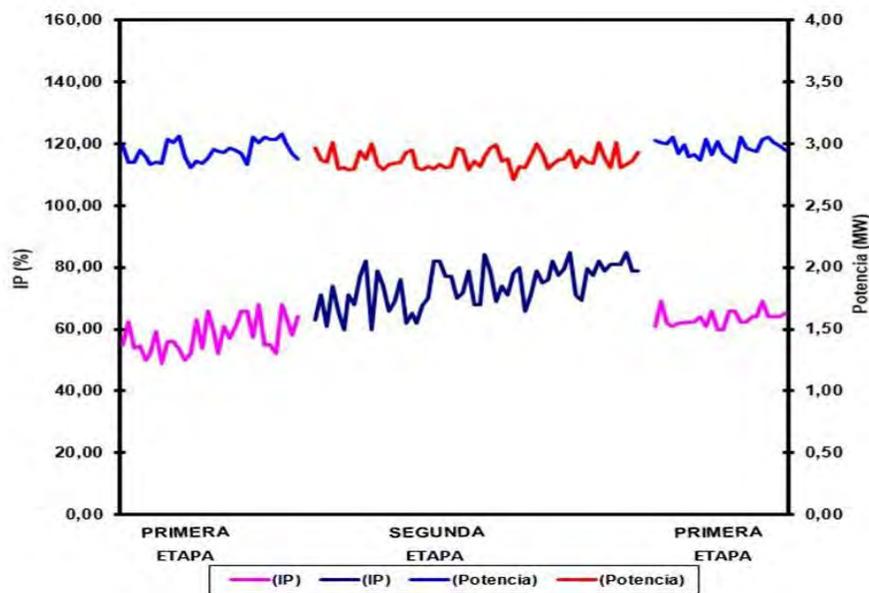
Para la preparación de la caña con dos juegos de cuchillas las humedades se comportaron dentro de un rango de 49,70 % a 52,90 % (Fig. 3.2). La inclusión de un tercer juego de cuchillas dio valores de humedad dentro de un rango de 49,27 % a 51,80 % (Fig. 3.2). En los últimos 24 días de zafra el índice de preparación disminuyó y las humedades aumentaron ligeramente hasta valores dentro del mismo rango de los primeros días de zafra (Fig. 3.2). El intervalo de confianza para la diferencia entre las medias se extiende desde 0,505 hasta 1,084. Puesto que este intervalo no contiene el valor cero, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras para un nivel de confianza del 95%. Estos resultados muestran que la humedad del bagazo final tiene dependencia del índice de preparación de la caña.



**Fig. 3.2.** Comportamiento del índice de preparación de la caña sobre la humedad del bagazo final.

### 3.1.3 Efecto de la variación del índice de preparación de la caña sobre la potencia demanda del tándem de molinos

Preparando la caña con dos juegos de cuchillas la demanda de potencia del tándem osciló entre 2,81 MW y 3,08 MW (Fig. 3.3), rango ligeramente mayor que cuando se preparó con tres juegos de cuchillas que varió desde 2,71 MW hasta 3,01 MW (Fig. 3.3), en los últimos 24 días de zafra la demanda de potencia tuvo un ligero aumento hasta comportarse dentro del rango de los primeros días de zafra (Fig. 3.3). De interés particular es el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 0,054 hasta 0,108. Puesto que el intervalo no contiene el valor cero, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras, con un nivel de confianza del 95 %. Estos resultados demuestran que mientras mejor es el índice de preparación de la caña menor es el consumo de energía en los molinos del tándem para la extracción (Fig. 3.3).



**Fig. 3.3.** Comportamiento del índice de preparación de la caña en la potencia demandada del tándem.

### 3.2 Diseño factorial para el estudio de la imbibición sobre el % pol y % humedad del bagazo final a escala industrial

Este experimento se realizó con el objetivo de conocer si existe diferencia significativa entre los por ciento de pol y humedad en el bagazo final al variar la temperatura y el flujo del agua de imbibición en el tándem. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en el anexo 3. Este estudio se realizó en el central Antonio Guiteras Holmes.

#### 3.2.1 Efecto de los parámetros de imbibición en el proceso de extracción para el % pol del bagazo final

El diagrama de Pareto (Fig. 3.4) muestra la influencia que tuvieron las variables temperatura del agua de imbibición y flujo de agua de imbibición, así como la interacción entre ellas. Las dos variables tuvieron efecto significativo en el por ciento de pol del bagazo final, porque las probabilidades fueron menores que 0,05, no siendo así para la interacción entre ellas (anexo 4).

El modelo completo, con las variables codificadas, se muestra en la ecuación (3.1):

$$Pol = 2,56 - 0,105 X_1 - 0,445 X_2 - 0,025 X_1 X_2 \text{ donde:} \quad (3.1)$$

*Pol*: Sacarosa aparente en el bagazo final (%).

Temperatura de imbibición: ( $T_i$ ), rango 37-75 (°C). Variable codificada  $X_1$ .

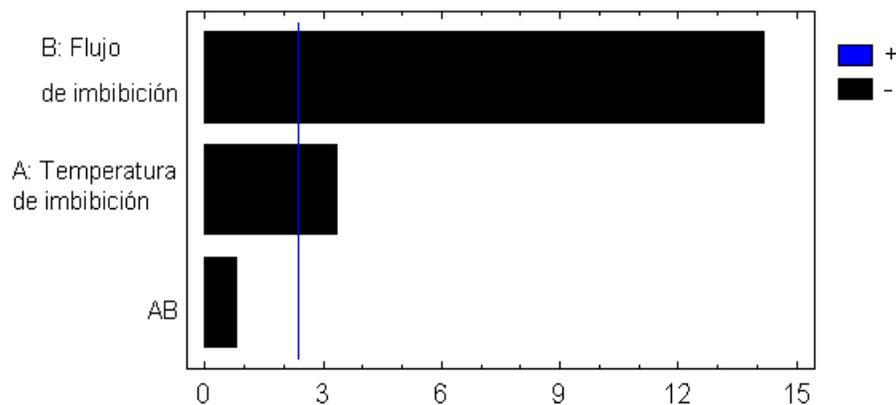
Flujo de imbibición: ( $F_i$ ), rango 50-76 (m<sup>3</sup>/h). Variable codificada  $X_2$ .

El análisis de varianza permite simplificar el modelo excluyendo la interacción al no ser significativa, ecuación (3.2).

$$Pol = 2,56 - 0,105 X_1 - 0,445 X_2 \quad (3.2)$$

El modelo descodificado se muestra en la ecuación (3.3); con este modelo es posible predecir los % pol en el bagazo final siempre que las variables independientes se encuentren dentro del rango estudiado.

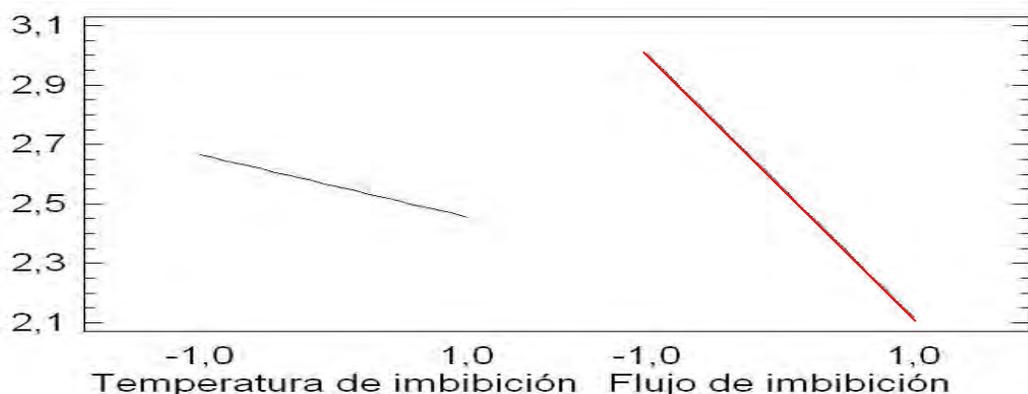
$$Pol = 5,02601214 - 0,00552632 \cdot T_i - 0,03423077 \cdot F_i \quad (3.3)$$



**Fig. 3.4.** Influencia de la temperatura y flujo de agua de imbibición sobre el por ciento de pol en el bagazo final.

Según el comportamiento de los efectos principales para el por ciento de pol, el efecto de la variabilidad para la temperatura de imbibición se encuentra entre 2,45 % y 2,69 %, con los mejores resultados para los valores altos. El efecto de la variabilidad para el flujo de imbibición se encuentra entre 2,15 % y 3,00 %, con los mejores resultados para los

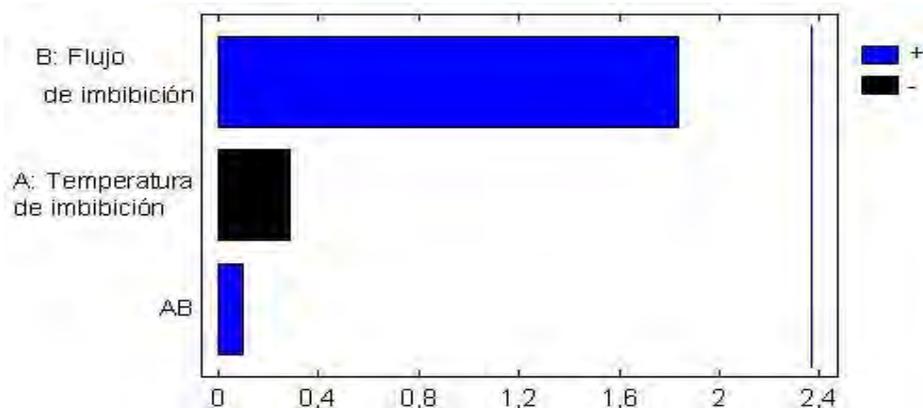
valores altos. El gráfico indica que el flujo del agua de imbibición tuvo mayor influencia que la temperatura de imbibición en la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y por consiguiente menor por ciento pol en el bagazo final (Fig. 3.5). Este es un resultado esperado ya que al aumentar la temperatura y el flujo del agua de imbibición se incrementa la transferencia de masa en el proceso.



**Fig. 3.5.** Gráfico de los efectos principales de la temperatura y flujo del agua de imbibición sobre el por ciento pol en el bagazo final.

### 3.2.2 Efecto de los parámetros de imbibición en el proceso de extracción para el % humedad del bagazo final

El diagrama de Pareto (Fig. 3.6) muestra la influencia de las variables temperatura del agua de imbibición y flujo de agua de imbibición, así como la interacción entre ellas. La variable que más influyó sobre el por ciento humedad fue el flujo de imbibición. Aun así, ninguna de las variables ni sus interacciones tuvo efecto significativo en el por ciento de la humedad del bagazo final, porque las probabilidades son mayores que 0,05 (anexo 5).



**Fig. 3.6.** Influencia de la temperatura y flujo de agua de imbibición sobre el porcentaje de humedad en el bagazo final.

Se demostró que el porcentaje de humedad del bagazo residual no depende significativamente de la temperatura ni del flujo del agua de imbibición, o sea, depende del trabajo del sexto molino, no sucede así con el porcentaje de pol.

### 3.3 Evaluación del proceso de lixiviación del tándem de molinos.

Los resultados de las variables analizadas en el experimento del proceso de lixiviación se muestran a continuación, teniendo en cuenta que el primer molino es el responsable de entregar el alimento (fibra+agua+sacarosa) al proceso de extracción en húmedo y no forma parte de él (tabla 3.2). Este estudio se realizó en el central Majibacoa.

**Tabla 3.2.** Valores de las variables analizadas en el proceso de lixiviación.

	Masa del jugo extraído por la prensa(g)	Masa de la torta (g)	Masa de la torta seca (g)	Brix del jugo (%)	Masa de jugo retenido en la torta (g)
<b>Molino 2</b>	72,1	127,90	82,90	19,00	45,00
<b>Molino 3</b>	67,5	132,50	66,74	18,60	65,76
<b>Molino 4</b>	64,1	135,90	79,96	18,00	55,94
<b>Molino 5</b>	63,8	136,20	80,74	17,40	55,46
<b>Molino 6</b>	71,3	128,70	76,25	11,20	52,45

Para la determinación de la curva de equilibrio, se determinó la masa del solvente (agua (A)) ecuación (3.4), la masa del sólido (bagazo (B)) ecuación (3.5), la masa del soluto (sólidos disueltos (C)) ecuación (3.6) y la masa total de la mezcla ecuación (3.7).

$$m_A = (m_{jugo} + m_{j\ torta}) \left(1 - \frac{Bx}{100}\right) \text{ donde:} \quad (3.4)$$

$m_A$ : Masa de solvente en la muestra de bagazo (g).

$m_{jugo}$ : Masa del jugo en la muestra de bagazo (g).

$m_{j\ torta}$ : Masa del jugo retenido en la torta de bagazo (g).

$Bx$ : Brix del jugo en la muestra de bagazo del molino correspondiente (%).

$$m_B = m_{torta\ seca} \text{ donde:} \quad (3.5)$$

$m_B$ : Masa de sólido en la muestra de bagazo (g).

$m_{torta\ seca}$ : Masa de la torta seca (g).

$$m_C = (m_{jugo} + m_{j\ torta}) \frac{Bx}{100} \text{ donde:} \quad (3.6)$$

$m_C$ : Masa de soluto en la muestra de bagazo (g).

$$m_T = m_{jugo} + m_{j\ torta} + m_{torta\ seca} \quad (3.7)$$

Las fracciones másicas de manera general se determinan según la ecuación (3.8) (Pávlov y cols, 1981).

$$X_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n (m_i)} \text{ donde:} \quad (3.8)$$

$i$ : Es un compuesto determinado de la mezcla (sólido, soluto o solvente).

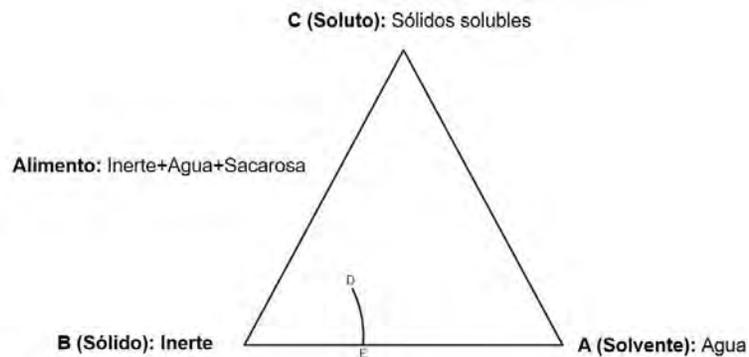
$X_i$ : La fracción másica de un determinado compuesto de la mezcla.

Los resultados de las fracciones másicas de los tres compuestos para obtener la curva de equilibrio del proceso de lixiviación se muestran a continuación (tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Fracciones másicas de cada componente por molino

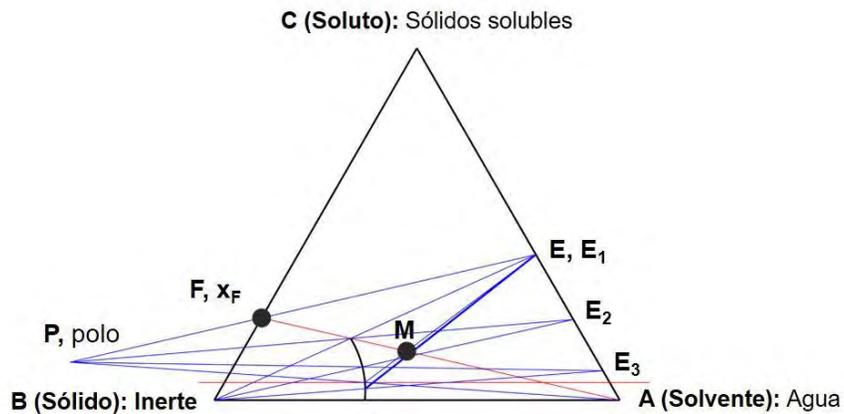
	<b>Solvente (A)</b>	<b>Sólido (B)</b>	<b>Soluto (C)</b>
<b>Molino 2</b>	0,474	0,415	0,111
<b>Molino 3</b>	0,542	0,334	0,124
<b>Molino 4</b>	0,492	0,400	0,108
<b>Molino 5</b>	0,493	0,404	0,104
<b>Molino 6</b>	0,549	0,381	0,069

Ubicando en el diagrama triangular los puntos de equilibrio por molinos se obtiene la curva de equilibrio del sistema (DE) para las condiciones reales de operación (Fig. 3.7).



**Fig. 3.7.** Determinación de la curva de equilibrio del proceso de extracción en húmedo.

Para la determinación del número de etapas teóricas se procedió según el procedimiento propuesto por Pávlov (Pávlov y cols, 1981) (Fig. 3.8).



**Fig. 3.8.** Determinación del número de etapas en el proceso de lixiviación del tándem

La eficiencia del proceso de lixiviación del tándem se calcula según la ecuación (3.9).

$$\eta = \frac{\#_{etapas\ teóricas}}{\#_{etapas\ reales}} \quad (3.9)$$

Conociendo que el número de etapas experimentales (ideales o teóricas) es tres (Fig. 3.8), y que el número de etapas reales del tándem es cinco, el rendimiento del proceso de lixiviación es del 60 %. Según Treybal (Treybal, 1977) un rendimiento del 80 % en un proceso de lixiviación es aceptable, por tanto, existe la posibilidad de introducir mejoras tecnológicas en el proceso para mejorar su rendimiento, entre ellas figuran: introducir el líquido de imbibición a la salida del molino anterior y no a la entrada del que va a realizar la compresión, suministrar ese líquido con mayor velocidad sobre el colchón de bagazo, eliminar las fluctuaciones en el flujo del líquido de lixiviación, aislar térmicamente de manera adecuada el sistema de tuberías que transporta el agua de imbibición y el uso de surfactantes en el líquido de imbibición.

### **3.4 Determinación de la abertura del plano neutral experimental**

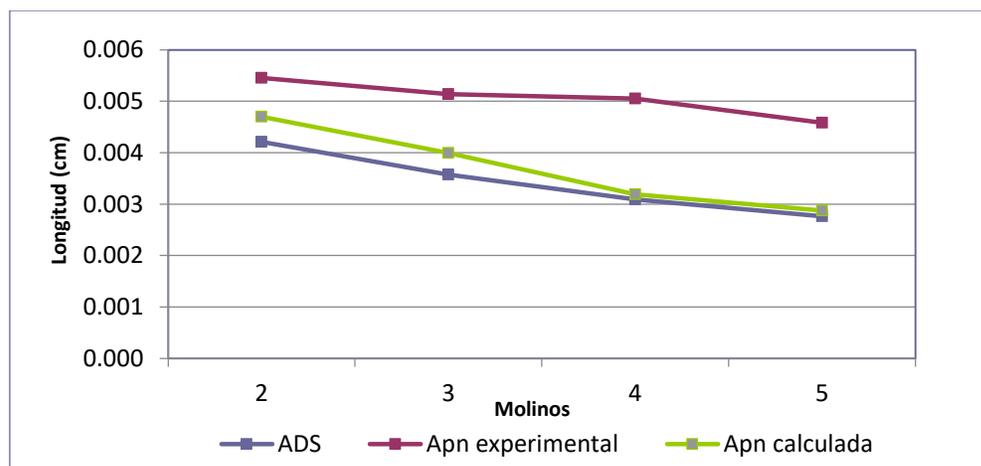
Se explicó en el epígrafe (2.6) que conceptualmente la abertura del plano neutral determinada experimentalmente (espesor de saturación) es el equivalente a la abertura del plano neutral calculada, a partir del cual comienza el proceso de extrusión, al que hacen referencia Jenkins y Murry (Jenkins, 1971; Murry, 1996). Este estudio se realizó en el central Antonio Guiteras Holmes.

Al determinar la abertura del plano neutral calculada ( $A_{pn}$  calculada) ecuación (1.2) con el coeficiente de reabsorción obtenido por el método que propone Sevilla (Sevilla y cols, 1977) ecuación (1.3), y estableciendo una comparación con la abertura del plano neutral

determinada experimentalmente ( $A_{pn}$  experimental), se obtiene una diferencia apreciable (Fig. 3.9) que incluye un margen de error elevado (tabla. 3.4).

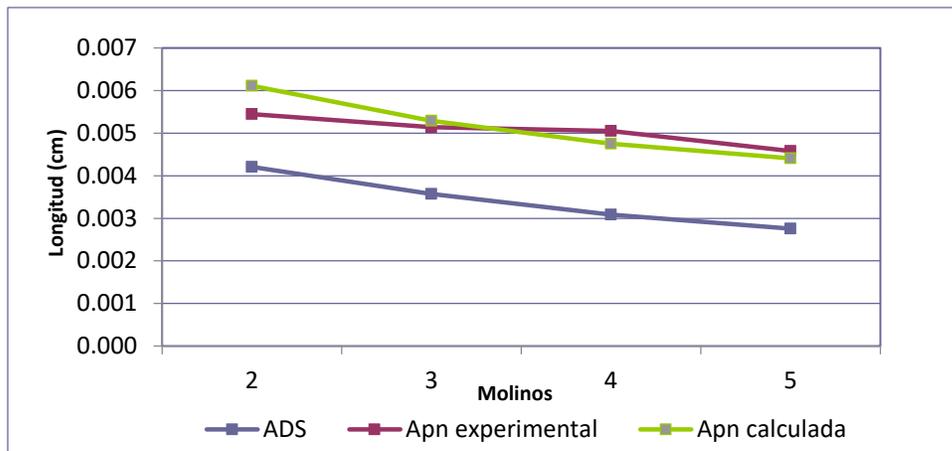
**Tabla 3.4.** Errores relativos entre la abertura en el plano neutral calculada y la experimental.

Molinos	Sevilla (%)	Hugot (%)	Autor (%)
2	13,77	12,12	1,14
3	22,36	2,95	1,72
4	36,82	5,90	2,43
5	37,25	3,73	1,70



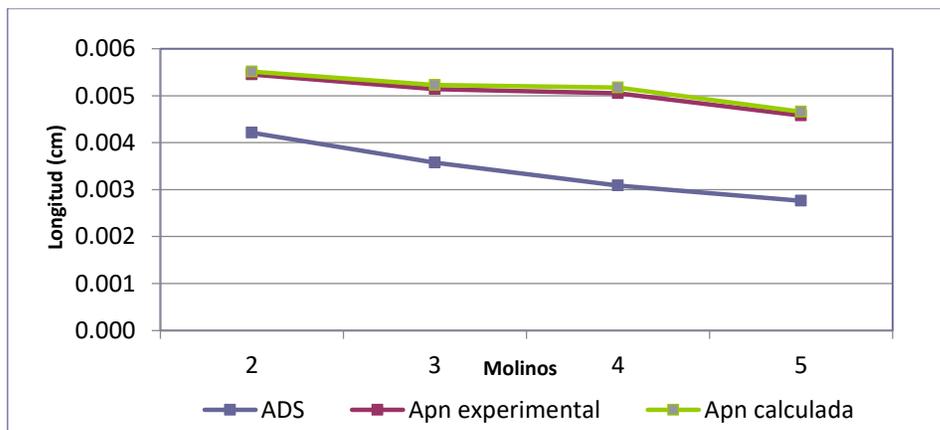
**Fig. 3.9.** Abertura del plano neutral utilizando el método de Elida Sevilla para determinar el coeficiente de reabsorción.

Por otro parte, empleando el método de Hugot (Hugot y cols, 1986) para la determinación del coeficiente de reabsorción, (ecuación 1.6), existe diferencia entre las aberturas del plano neutral calculada y experimental (Fig. 3.10). Aunque los errores son menores que los obtenidos por Sevilla (Sevilla y cols, 1977) (tabla. 3.4), aún no son resultados satisfactorios respecto a la abertura del plano neutral determinada experimentalmente porque en la mayoría de los molinos el error pasa del cinco por ciento.



**Fig. 3.10.** Abertura del plano neutral utilizando el método de Hugot para determinar el coeficiente de reabsorción.

Al comparar la abertura del plano neutral determinada experimentalmente y la calculada (teniendo en cuenta el coeficiente de reabsorción propuesta por el autor, ecuación (2.2)), de todos los procedimientos es el de menor por ciento de error (tabla. 3.4), esto indica la confiabilidad del método propuesto en esta investigación (Fig. 3.11).



**Fig. 3.11.** Abertura del plano neutral utilizando el método del autor para determinar el coeficiente de reabsorción.

### 3.5 Coeficiente de reabsorción

Según la ecuación (2.2) el coeficiente de reabsorción será la unidad cuando se igualen la abertura del plano neutral (sea la experimental o la calculada) y la abertura dinámica de salida. Nunca será menor que la unidad porque para que eso ocurra la abertura

dinámica de salida tendrá que ser mayor que la abertura del plano neutral, si esto sucediera no hubiera compresión del bagazo. Este estudio se realizó en el central Antonio Guiteras Holmes.

Bajo las condiciones en que se desarrolló el experimento, se cumple que el coeficiente de reabsorción va en ascenso hasta el quinto molino en un tándem de seis molinos (tabla 3.3), esto está totalmente de acuerdo con lo planteado por Hugot, Sevilla, Russel y Murry (Hugot y cols, 1986; Murry, 1996; Russel, 1968; Sevilla, 1982). Sin embargo, para el sexto molino disminuye (tabla 3.5), en este caso diverge de lo planteado por los autores mencionados anteriormente, pero coincide con las investigaciones realizadas por Murry (Murry, 1971) (tabla 1.1). Esto puede estar dado por la adición del agua de imbibición. Como es conocido, exceptuando el primer molino y al sexto, que es al que se le añade al agua de imbibición, al resto se le adiciona el jugo del molino que le precede. En el caso del sexto se le añade el agua a una temperatura promedio que oscila entre 70 °C y 75 °C, esta agua tiene una densidad menor que la de los jugos añadidos a cada molino, por lo que la viscosidad del jugo en el sexto molino disminuye facilitando así un aumento en su extracción, por tal motivo el coeficiente de reabsorción disminuye.

**Tabla 3.5.** Coeficientes de reabsorción obtenidos según el método del autor

Molinos	Abertura dinámica de salida (cm)	Abertura del plano neutral (cm)	Coefficiente de reabsorción
1	5,76	5,88	1,02
2	4,21	5,45	1,30
3	3,57	5,14	1,44
4	3,09	5,05	1,64
5	2,76	4,58	1,66
6	2,63	3,64	1,38

Para lograr una disminución del coeficiente de reabsorción es necesario aumentar la abertura dinámica de salida. Este aumento se puede lograr disminuyendo las presiones hidráulicas aplicadas en los molinos, lo que implica que haya que prestar mayor atención a los parámetros de imbibición, pues ellos influyen directamente en los fenómenos de transferencia de masa y por consiguiente mejoran la calidad del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. De cualquier modo, la idea es disminuir la presión hidráulica a aplicar en los molinos intermedios del tándem hasta que se igualen la abertura del plano neutral experimental y la abertura del plano axial de modo que el coeficiente de reabsorción sea lo más próximo a la unidad.

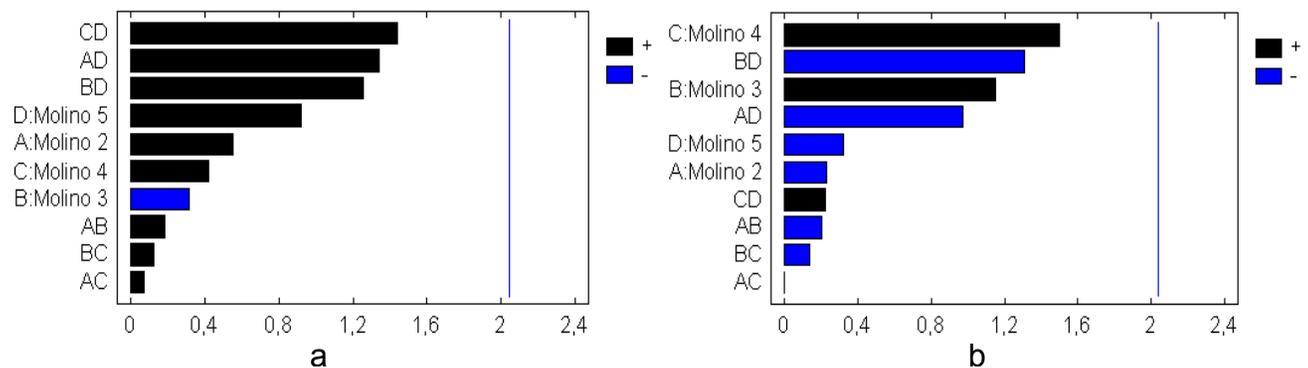
Independientemente de las condiciones reales en que se encuentre el estado técnico del tándem, rayado de las mazas y del ajuste de los molinos, es posible aplicar los procedimientos para determinar la abertura del plano neutral y el coeficiente de reabsorción y así poder corregir las presiones, en esos resultados están presentes la influencia de todas esas variables. Por tal motivo los resultados dependen de esas variables.

### **3.6 Diseño factorial para el estudio del efecto de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios sobre el % pol y % humedad del bagazo final y demanda de potencia de tándem**

Este experimento se realizó con el objetivo de conocer si existe diferencia significativa entre los por ciento pol y humedad en el bagazo final al disminuir las presiones hidráulicas en los molinos intermedios del tándem. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en el anexo 6. Este estudio se realizó en el central Antonio Guiteras Holmes.

### 3.6.1 Efecto de la disminución de presión sobre el % pol en el bagazo final

El diagrama de Pareto muestra la influencia que tuvieron las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre el por ciento de pol del bagazo final en las dos etapas: con la preparación de la caña con dos juegos de cuchilla (a) y con tres juegos de cuchillas (b) (Fig. 3.12). Ninguna de las variables independientes ni sus interacciones tuvo efectos significativos sobre el proceso de extracción en el rango de valores de presión hidráulica estudiados para un nivel de confianza del 95 %, porque las probabilidades son mayores a 0,05 (anexos 7 y 8). Este resultado indica que el por ciento de pol en bagazo final depende fundamentalmente de la preparación de la caña y de la calidad del proceso de lixiviación (proceso de imbibición en los molinos de extracción en húmedo). Frecuentemente, no se le presta la atención que requiere el proceso de lixiviación de la sacarosa del bagazo y se polariza la actividad hacia el control de las presiones hidráulicas y la preparación de la caña (Corrales y cols, 2013).

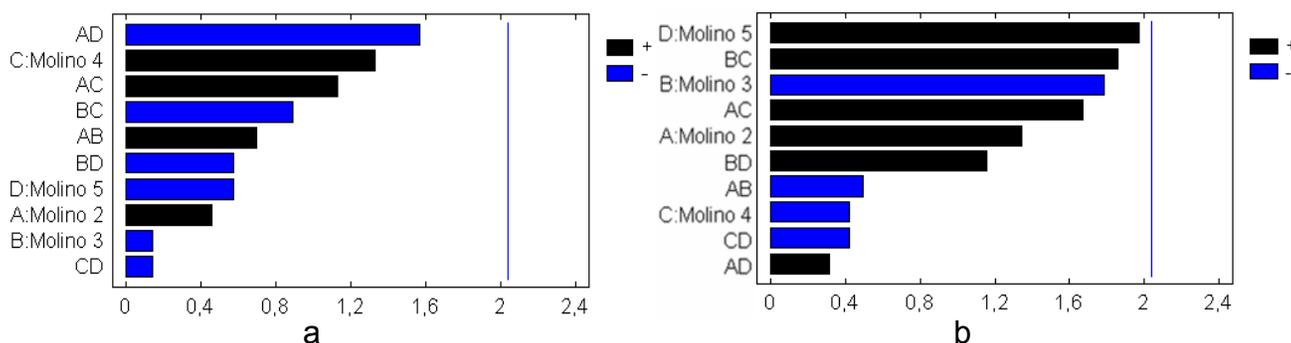


**Fig. 3.12.** Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre el por ciento de pol en el bagazo final.

### 3.6.2 Efecto de la disminución de presión sobre el % humedad en el bagazo final

En las dos etapas: (a) con la preparación de la caña con dos juegos de cuchilla y (b) con tres juegos de cuchillas, ninguna de las variables independientes ni sus interacciones

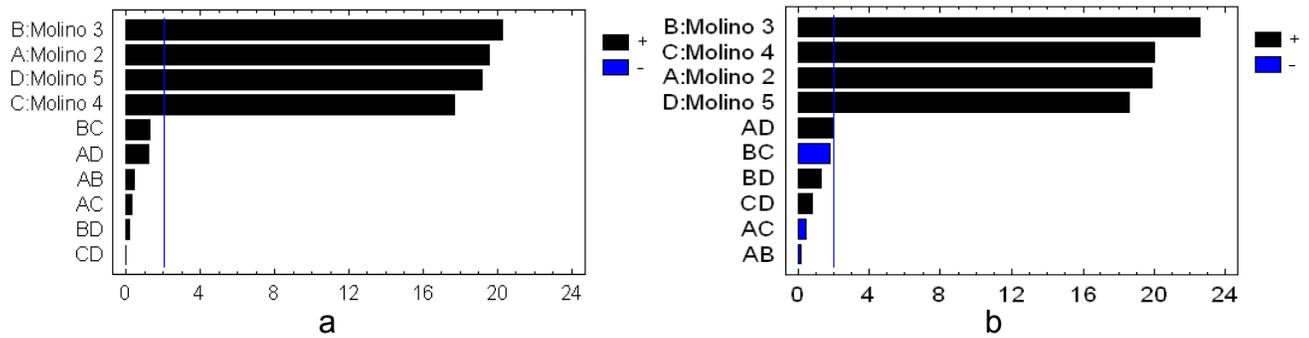
tuvo efectos significativos sobre la humedad del bagazo final (Fig. 3.13) en el rango de valores de presión hidráulica estudiados, para un nivel de confianza del 95%, porque las probabilidades son mayores a 0,05 (anexos 9 y 10). Este resultado indica que la humedad del bagazo final depende fundamentalmente de la eficiencia del último molino del tándem, que realiza la función de molino secador.



**Fig. 3.13.** Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre el % humedad en el bagazo final.

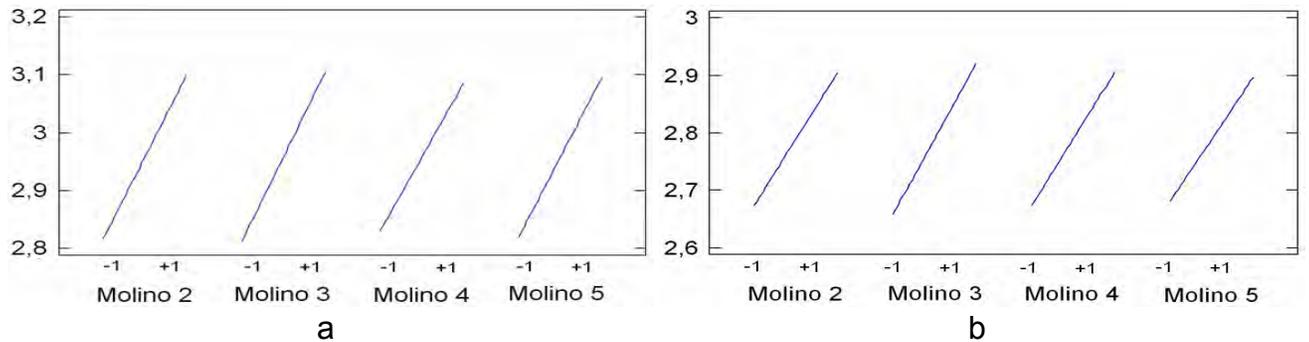
### 3.6.3 Efecto de la disminución de presión sobre la demanda de potencia

En el diagrama de Pareto (Fig. 3.14) se muestra la influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios en la demanda de potencia del tándem en las dos etapas, con la preparación de la caña con dos juegos de cuchilla (a) y con tres juegos de cuchillas (b). La variación de las presiones hidráulicas tuvo efecto significativo al 95 % de confianza en la demanda de potencia, no siendo así para las interacciones (anexos 11 y 12).



**Fig. 3.14.** Influencia de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre la demanda de potencia.

El comportamiento del gráfico de los efectos principales en el modelo indica que la potencia demandada por el tándem disminuyó hacia los valores bajos de las presiones hidráulicas (Fig. 3.15). El comportamiento del modelo coincide con los resultados de otros investigadores (Gil, J M, 2011; Hugot y cols, 1986; Jenkins, 1971).



**Fig. 3.15.** Gráfico de los efectos principales de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios sobre la demanda de potencia.

La preparación de la caña para las condiciones en que se realizó el experimento tuvo incidencia en la demanda de potencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, porque con los tres juegos de cuchillas disminuyó (Fig. 3.15). A continuación, se presenta un modelo matemático completo para cada caso.

### 3.6.3.1 Modelos matemáticos para la demanda de potencia del tándem

La ecuación del modelo ajustado para cuando se preparó la caña con dos juegos de cuchillas se presenta en la ecuación (3.10).

$$\begin{aligned} \text{Potencia} = & 2,95762 + 0,14125 P_2 + 0,14625 P_3 + 0,1275 P_4 \\ & + 0,138125 P_5 - 0,003125 P_2 P_3 - 0,001875 P_2 P_4 + 0,00875 P_2 P_5 \quad \text{donde:} \quad (3.10) \\ & - 0,009375 P_3 P_4 + 0,00125 P_3 P_5 + 0,0 P_4 P_5 \end{aligned}$$

*Potencia:* Potencia demandada por el tándem (MW).

Presión hidráulica molino 2: ( $P_{m2}$ ), rango 14,50-17,90 (MPa). Variable codificada  $P_2$ .

Presión hidráulica molino 3: ( $P_{m3}$ ), rango 13,10-16,50 (MPa). Variable codificada  $P_3$ .

Presión hidráulica molino 4: ( $P_{m4}$ ), rango 13,10-16,50 (MPa). Variable codificada  $P_4$ .

Presión hidráulica molino 5: ( $P_{m5}$ ), rango 14,50-17,90 (MPa). Variable codificada  $P_5$ .

El análisis de varianza permite simplificar el modelo, excluyendo todas las interacciones al no ser significativas, ecuación (3.11).

$$\text{Potencia} = 2,95762 + 0,14125 P_2 + 0,14625 P_3 + 0,1275 P_4 + 0,138125 P_5 \quad (3.11)$$

El modelo descodificado se muestra en la ecuación (3.12); con este modelo es posible predecir la demanda de potencia del tándem siempre que las variables independientes se encuentren dentro del rango estudiado.

$$\text{Potencia} = -2,087894 + 0,083088 P_{m_2} + 0,086029 P_{m_3} + 0,074999 P_{m_4} + 0,081250 P_{m_5} \quad (3.12)$$

La ecuación del modelo ajustado para cuando se preparó la caña con tres juegos de cuchillas se presenta en la ecuación (3.13).

$$\begin{aligned} \text{Potencia} = & 2,78905 + 0,115625 P_2 + 0,13125 P_3 + 0,11625 P_4 \\ & + 0,108125 P_5 - 0,00125 P_2 P_3 - 0,0025 P_2 P_4 + 0,011875 P_2 P_5 \quad \text{donde:} \quad (3.13) \\ & - 0,010625 P_3 P_4 + 0,0075 P_3 P_5 + 0,005 P_4 P_5 \end{aligned}$$

*Potencia:* Potencia demandada por el tándem (MW).

Presión hidráulica molino 2: ( $P_{m_2}$ ), rango 14,50-17,90 (MPa). Variable codificada  $P_2$ .

Presión hidráulica molino 3: ( $P_{m_3}$ ), rango 13,10-16,50 (MPa). Variable codificada  $P_3$ .

Presión hidráulica molino 4: ( $P_{m_4}$ ), rango 13,10-16,50 (MPa). Variable codificada  $P_4$ .

Presión hidráulica molino 5: ( $P_{m_5}$ ), rango 14,50-17,90 (MPa). Variable codificada  $P_5$ .

El análisis de varianza permite simplificar el modelo excluyendo todas las interacciones al no ser significativas, ecuación (3.14).

$$Potencia = 2,78905 + 0,115625 P_2 + 0,13125 P_3 + 0,11625 P_4 + 0,108125 P_5 \quad (3.14)$$

El modelo descodificado se muestra en la ecuación (3.15); con este modelo es posible predecir la demanda de potencia del tándem siempre que las variables independientes se encuentren dentro del rango estudiado.

$$Potencia = -1,497861 + 0,068014 P_{m_2} + 0,077206 P_{m_3} + 0,068382 P_{m_4} + 0,063603 P_{m_5} \quad (3.15)$$

Se demuestra que, independientemente de la preparación de la caña, las presiones hidráulicas a aplicar en los molinos intermedios no son significativas para el por ciento pol y humedad del bagazo residual, pero si en la demanda de potencia del tándem. Además, los modelos indican que la demanda de potencia aumenta con el incremento de las presiones hidráulicas.

### **3.7 Diseño en bloque al azar para la evaluación industrial del efecto de la disminución de presión en los molinos intermedios del tándem**

En el período de los experimentos se midieron las variables dependientes en los centrales azucareros Antonio Guiteras Holmes y Majibacoa con tres juegos de cuchillas (tabla 3.6). Este estudio se realizó en los dos centrales (Antonio Guiteras Holmes y Majibacoa).

**Tabla 3.6.** Valores de los parámetros de calidad del bagazo en el experimento

No. Exp	Antonio Guiteras Holmes				Majibacoa			
	Pol (%)		Humedad (%)		Pol (%)		Humedad (%)	
	PT	PE	PT	PE	PT	PE	PT	PE
1	2,48	2,50	48,60	48,20	2,91	2,78	50,04	52,60
2	2,17	2,25	50,60	49,20	2,70	2,70	50,85	51,84
3	2,20	2,79	49,60	48,60	2,66	2,70	50,90	51,64
4	2,56	2,34	50,60	49,80	2,75	2,76	52,89	52,32
5	2,26	2,45	50,10	49,50	2,84	2,79	52,89	52,00
6	2,32	2,17	48,90	49,10	2,75	2,74	51,30	50,22
7	2,16	2,33	49,40	50,10	2,83	2,83	52,42	50,92
8	2,21	2,25	48,80	48,90	2,87	2,76	51,72	50,87
9	2,23	2,12	49,20	49,50	2,74	2,80	52,04	51,52

Los datos experimentales fueron sometidos a una prueba de bondad de ajuste a una distribución normal. Se comprobó que la hipótesis de que los datos proceden de distribuciones normales no se rechaza al nivel de significación de 0,05 ya que el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada están dentro del rango de -2 a +2 (tabla 3.7).

**Tabla 3.7.** Prueba de normalidad de los valores experimentales de los por ciento de pol y humedad en el bagazo final

Antonio Guiteras Holmes	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Pol, PT	1,54461	0,239273
Pol, PE	1,49314	1,08108
Humedad, PT	0,510449	-0,806057
Humedad, PE	-0,320386	-0,201301
Majibacoa	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
Pol, PT	0,122487	-0,682334
Pol, PE	-0,235163	-0,392691
Humedad, PT	-0,276563	-0,579853
Humedad, PE	-0,518596	-0,287648

Para determinar si la disminución de la presión hidráulica influyó sobre el por ciento de pol y el por ciento de humedad en el bagazo final y si estos resultados estuvieron influenciados también por los bloques, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de clasificación doble a un nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados del ANOVA respecto

a la probabilidad de aceptar las hipótesis de igualdad de las medias y de la no influencia de los bloques aparecen en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8.** Resultados del análisis de varianza

	%PolIPT vs %PolPE	%Humedad PT vs % humedad PE
	Probabilidad	Probabilidad
Antonio Guiteras Holmes		
Tratamiento	0,4226	0,1992
Bloque	0,4366	0,0798
Majibacoa		
Tratamiento	0,3522	0,7809
Bloque	0,0560	0,5976

Al ser las probabilidades calculadas mayores de 0,05, no existe diferencias significativas entre los por ciento de pol y los por ciento de humedad en el bagazo residual cuando se trabajó a las presiones hidráulicas de trabajo y a las experimentales en los molinos de extracción en húmedo de cada tándem.

Estos resultados indican que el proceso de extracción en los molinos de extracción en húmedo debe estudiarse como un proceso de lixiviación-compresión y que la lixiviación influye fuertemente en los resultados del tándem.

Considerando que el agua de imbibición o los jugos que se vierten sobre el colchón de bagazo son completamente absorbidos por la capa superficial (Gil, J M y cols, 2011), es posible introducir mejoras tecnológicas que contribuyan a un mejor mezclado del líquido de imbibición con el jugo rico en sacarosa que retiene la matriz porosa del bagazo. Esto demuestra que mejorando el proceso de lixiviación en el tándem de molinos es posible trabajar a menores presiones sin afectar el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, porque el jugo retenido por la fibra sería jugo diluido y no el jugo sin diluir debido al insuficiente mezclado. Además, se conoce que la presión efectiva de los molinos intermedios es mucho menor que las presiones empleadas tradicionalmente (Gil,

J M, 2011). El empleo de menores presiones causaría una disminución en el índice de roturas de los molinos, menos desgaste de las partes móviles y menor consumo energético (Hugot y cols, 1986).

### 3.8 Ahorro de energía debido a la disminución de las presiones hidráulicas

Por medio de la ecuación (1.7) se calculó la potencia demandada por el motor eléctrico de cada molino. En el central “Antonio Guiteras Holmes” hubo una disminución en la demanda de potencia de 412,83 kW al disminuir las presiones de trabajo hasta las experimentales. En el central “Majibacoa” la disminución en la demanda de potencia fue de 273,63 kW (tabla 3.9).

**Tabla 3.9.** Potencia demandada por molinos

Molinos	Demanda de potencia, kW			
	Antonio Guiteras		Majibacoa	
	De trabajo	Experimentales	De trabajo	Experimentales
Molino 1	492,90	492,90	308,36	308,36
Molino 2	577,44	483,84	548,64	484,19
Molino 3	560,35	451,05	572,39	505,08
Molino 4	576,03	463,56	629,69	554,13
Molino 5	600,37	502,92	598,07	531,75
Molino 6	560,39	560,39	521,39	521,39
Total	3367,47	2954,65	3178,54	2904,92
Diferencia	412,83		273,63	

El ahorro de energía eléctrica se calculó sobre la base de 100 días de zafra. Si se hubiera trabajado con las presiones experimentales durante ese período, en el central Antonio Guiteras el ahorro de energía sería de 990,78 MWh/zafra y para el central Majibacoa de 656,70 MWh/zafra, para un ahorro total de 1,64 GWh/zafra. Esta cantidad de energía se entregaría al sistema slectroenergético nacional, siendo así, se tendría un incremento monetario de \$282 771,50.

El autor de esta investigación (Corrales y cols, 2013) ha estudiado la posibilidad de reducir la presión a aplicar en los molinos intermedios de un tándem cañero sin afectar el proceso de extracción para hacer un uso racional de la energía. En su investigación no propone mejorar la extracción sino reducir el consumo de energía para hacer un uso racional de ella. En la zafra del 2013 Peña (Peña, 2013) evaluó los resultados del autor de esta investigación (Corrales y cols, 2013) en el central azucarero Antonio Guiteras Holmes de la provincia Las Tunas y corroboró que la disminución de las presiones hidráulicas de operación en los molinos intermedios del tándem para 3,45 MPa (500 PSI) no influyó de manera significativa en los por ciento de pol y humedad en el bagazo final. Sin embargo, implica un ahorro considerable de energía. En la misma zafra Verdecia (Verdecia, 2013) los evaluaba pero en el central Majibacoa para una disminución de 2,07 MPa (300 PSI), lo resultados obtenidos fueron los mismos.

### **3.9 Conclusiones parciales**

1. La variación del flujo másico del agua de imbibición desde 50 t/h hasta 76 t/h y la temperatura desde 37 °C hasta 75 °C, no influyeron significativamente en la humedad del bagazo residual, pero si en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y en mayor medida influyó el flujo del agua de imbibición.
2. En el proceso de lixiviación existente es posible introducir mejoras tecnológicas que permitan incrementar su eficiencia.
3. Independientemente de la preparación de la caña, las presiones hidráulicas a aplicar en los molinos intermedios del tándem para el rango estudiado, no tienen efecto significativo sobre los por ciento de pol y humedad en el bagazo residual, pero si en la demanda de potencia del tándem.

4. Con el incremento de la preparación de la caña aumenta la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y disminuyen la humedad en el bagazo residual y la demanda de potencia del tándem.

## **CONCLUSIONES**

## **CONCLUSIONES**

1. Los técnicos del tándem en los centrales azucareros prestan mayor atención a los ajustes del molino, a la alimentación forzada y a las presiones hidráulicas en los molinos de extracción en húmedo que al proceso de lixiviación de la sacarosa del bagazo, acerca del cual tienen poca información.
2. Al preparar la caña con tres juegos de cuchillas se obtiene mejores resultados de porcentaje de pol, humedad en el bagazo final y demanda de potencia del tándem respecto a la preparación con dos juegos de cuchillas.
3. Al aumentar el flujo y la temperatura del agua de imbibición dentro de los rangos estudiados influyen significativamente sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar disminuyendo el porcentaje de pol en bagazo, pero no sobre la humedad del bagazo final.
4. El proceso que ocurre en los molinos de extracción en húmedo de un tándem cañero es una combinación de los efectos de las operaciones de lixiviación y compresión, esta última como proceso de mezclado del agua o jugos con el bagazo, dando la posibilidad de introducir mejoras tecnológicas que contribuyen a mejorar el proceso de lixiviación,

pues es posible disminuir las presiones hidráulicas de trabajo sin afectar los resultados del proceso de extracción de la sacarosa.

5. La disminución de las presiones hidráulicas aplicadas en los molinos de extracción en húmedo, independientemente de la preparación de la caña con dos o tres juegos de cuchillas, no tuvo efectos significativos sobre el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar ni sobre la humedad del bagazo residual, pero sí de forma notable en la demanda de potencia del tándem.
6. A diferencia de los procedimientos empleados por otros autores, los creados y experimentados en esta investigación para la determinación de la abertura del plano neutral y el coeficiente de reabsorción, poseen como ventaja que son sencillos de aplicar, con resultados rápidos e incluyen implícitamente las propiedades físicas de la caña, la eficiencia del proceso de lixiviación, las condiciones mecánicas reales de los molinos y de operación del tándem.
7. Con la disminución de las presiones hidráulicas en los molinos intermedios del tándem no se afecta el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar y se tiene un ahorro de energía de 990,78 MWh/zafra en el central Antonio Guiteras Holmes, de 656,70 MWh/zafra en el central Majibacoa para un total de 1 647,48 MWh/zafra, lo que implica un ahorro monetario de 282 771,50 \$/zafra.

## **RECOMENDACIONES**

## **RECOMENDACIONES**

1. Introducir los nuevos criterios acerca de la operación del tándem en la agroindustria azucarera teniendo en cuenta que el proceso de lixiviación tiene mayor influencia que el de compresión en la extracción en húmedo de la sacarosa de la caña de azúcar.
2. Aplicar estos procedimientos en los centrales del país como herramienta para disminuir el consumo de energía.
3. Aplicar las presiones hidráulicas mínimas necesarias en los molinos de extracción en húmedo, siguiendo el procedimiento experimental desarrollado en esta investigación, teniendo en cuenta que el objetivo de esta etapa es lixiviar la sacarosa retenida por el bagazo.
4. Investigar el posible ahorro de energía e incremento de la capacidad de molienda del primer molino por racionalizar las presiones hidráulicas sobre la base del concepto de abertura en el plano neutral, siguiendo el procedimiento experimental desarrollado en esta investigación.

**PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DEL AUTOR RELACIONADA CON  
EL TEMA**

## **Producción científica del autor relacionado con el tema**

### **Publicaciones en revistas**

1. Corrales, J. M., Gil, J. M., Remédios, P. D., et al. "Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas". Revista Ingeniería Mecánica. vol. 16, nº. 3, septiembre-diciembre. 2013. ISSN 1815-5944. Cuba.
2. Corrales, J. M., Gil, J. M., Remédios, P. D., et al. "Operación de los molinos del tándem cañero a dos niveles de presión hidráulica". Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. vol. 16, nº. 1, enero-marzo. 2015: ISSN 1405-7743. México.
3. Corrales, J. M., Gil, J. M., Remédios, P. D., et al. "Influencia de un tercer juego de cuchillas en la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar". Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. vol. 16, nº. 4, octubre-diciembre. 2015. ISSN 1405-7743. México.

### **Presentaciones en eventos científicos**

1. VII Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales "CINAREM". Título "Protección del medio ambiente a través del ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas". ISBN No. 978-959-16-2244-0. Moa, Holguín. 2013. Autor.
2. 2da Conferencia Científica Internacional Yayabociencia. Título "Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas". ISBN: 978-959-250-914-6 Sancti Spíritus. Cuba. 2013. Autor.

3. VII Conferencia Científica Internacional de la Universidad de Holguín. Título “Operación de los molinos del tándem cañero a dos niveles de presión hidráulica”. ISBN: 978-959-16-2472-7 Holguín. Cuba. 2015. Autor.

### **Premios provinciales**

1. Premio CITMA Provincial. Título: “Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas”. 2013.
2. Premio FORUM Provincial. Título: “Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas”. Relevante. 2013.
3. Premio CITMA Provincial. Título: “Operación de los molinos del tándem cañero a dos niveles de presión hidráulica”. 2014.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adam, C. J. y Loughran, J. G. The effect of blanket thickness on extraction energy in sugarcane rolling mills: A finite element investigation. Rev. Biosystems Engineering. Vol. 92, p. 255-263. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/archive/00003709>. ISSN 1615-7605 2005.
2. Adam, C. J. y Loughran, J. G. Optimising the design of sugarcane rolling mills using finite element computer simulation. Rev. International Sugar Journal. Vol. 109, p. 272-284. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au>. ISSN 1350-1917. 2007.
3. Arzola, N.; Goytisoló, R. A. y Suárez, L. Elevación de la eficiencia de extracción de jugo de caña en los molinos de caña de azúcar. VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. p. 991-997. Disponible en: <http://www.pucp.edu.pe/congreso/cibim8/pdf/25/25-14.doc>. 2007.
4. Azaret, A. y cols. Extracción en el tándem del central "Melanio Hernández". Rev. Centro Azúcar. Vol 32, nº 3, p. 34-38. ISSN 2223-4861. 2005.
5. Azaret, A. J. y cols. Consumo de potencia en el tándem del central "Melanio Hernández". Rev. Centro Azúcar. Vol 31, nº 4, p. 42-45. ISSN 2223-4861. 2004.
6. Barreiro, J. B. Manual de operaciones. Planta moledora. Dirección de maquinaria industrial. Minaz. La Habana. 2011.
7. Box, E. P. y Hunter, W. G. Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis, and model building. ISBN: 0-471-09315-7. <http://books.google.com/cu/books?id=QaFqAAAAMAAJ>. 1978.
8. Bullock, K. J. An investigation into the crushing and physical properties of sugar cane and bagasse. Ph.D. Thesis. University of Queensland. Disponible en: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:216770>. 1957.
9. Burmístrova, O. A. Prácticas de química física. 1977.
10. Cabello, M. J. y cols. Mecanismo equivalente para el análisis cinemático y dinámico de las coronas de molinos de caña de azúcar. Rev. Centro Azúcar. Vol 36, nº 1, p. 63-67. Disponible en: <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2009/1/11.pdf>. ISSN 2223-4861. 2009.
11. Casanova, F. y Aguilar, Y. A study on the wear of sugar cane rolls. Rev. International of the science and technology of friction lubrication an wear. Vol 265, nº 1-2, p. 236-243. Disponible en:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807006825>. ISSN 0043-1646. 2008.
12. Castro, O. E. Evaluación del sistema de imbibición del tandem de molinos en la UEB fábrica de azúcar "Antonio Guiteras Holmes". Jorge Michel Corrales Suárez, Tutor. Trabajo de Diploma. Universidad de Las Tunas. 2012.
  13. Castro, Y. R.; Pérez, E. y Azaret, A. Medición del consumo de potencia en molinos con caña azucarera y con caña energética en el central "Melanio Hernández". Rev. Centro Azúcar. Vol 31, nº 1, p. 31-34. ISSN 2223-4861. 2004.
  14. Corrales, J. M. y cols. Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas. Rev. Ingeniería mecánica. Vol 16, nº 3, p. 186-193. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/463/819>. ISSN 1815-5944. 2013.
  15. Corrales, J. M. y cols. Operacion de los molinos del tándem cañero a dos niveles de presión hidráulica. Rev. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol 16, nº 1, p.123-130. Disponible en: [http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V16N1/V16N1\\_art12.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V16N1/V16N1_art12.pdf). ISSN: 1405-7743. 2015.
  16. Corrales, J. M. y cols. Influencia de un tercer juego de cuchillas en la eficiencia del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Rev. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol 16, nº 4, p. 599-604. Disponible en: [http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V16N4/V16N4\\_art11.pdf](http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V16N4/V16N4_art11.pdf). ISSN: 1405-7743. 2015a.
  17. Cullen, R. N. An investigation of the shear strength of bagasse. Master's Thesis. University of Queensland Disponible en: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:217643>. 1965.
  18. David, L. y cols. Efecto de la geometría de los depósitos de soldadura de recubrimiento en el desgaste de acero bajo al carbono en contacto con bagazo de caña de azúcar. Rev. Ingeniería Universidad. Vol 17, nº 1, p. 127-141. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=88905632&lanq=es&site=ehost-live>. ISSN 0123-2126. 2013.
  19. Deerr, N. The milling of cane considered in relation to the volume occupied by the fiber. Hawaiian Sugar Planters' Association. Vol 28. 1912.
  20. Díaz, A. y Iglesias, C. Bases teóricas para la fundamentación del proceso de extracción de jugo de caña de azúcar para la producción de panela. Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol 21, nº 1, p. 53-57. Disponible en: <http://www.rcta.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/download/56/57>. ISSN 2071-0054. 2012a.
  21. Díaz, A. y Iglesias, C. Dinámica del proceso de extracción de jugo a compresión de la caña de azúcar para la producción de panela. Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol 21, nº 2, p. 1-5. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n2/rcta14212.pdf>. ISSN 2071-0054. 2012b.
  22. Domínguez, J. M.; Limonta, J. y García, F. Consumo energético en una fábrica de azúcar de caña de pequeña capacidad de molida. Rev. Tecnología Química. Vol

- 23, n° 2, p. 55-63. Disponible en: <https://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/download/2072/1621>. 2003.
23. Dovale, Y. Influencia de la preparación de la caña en la demanda de potencia del tandem de molinos. Jorge Michel Corrales Suárez, Tutor. Trabajo de Diploma. Universidad de Las Tunas. 2013.
24. Dunn, K. G.; Broadfoot, R. y Sockhill, D. Energy efficiency opportunities at kalamia mill-a case study. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 410-419. Vol 31. Disponible en: <http://www.assct.com.au/media/pdfs/2009-M-11-Dunn.pdf>. 2009.
25. Espinosa, A.; Moya, J. y Fernández, F. Incremento de la eficiencia de la extracción de jugo en un molino de caña mediante la obtención de las presiones hidráulicas requeridas en cada pistón. Disponible en: <http://previewer.org/?pdfurl=1qeXpurpn6Wih-SUpOGunaWnh7W9ube5taq-xriOuKuVuaaMtLyut7GqvrWyr5Squo2xrY-7vci6prO1sjEHtJWxqoy5y6zDiKq-kr68ILPEua66vpaTopaHq-Wjn66I24-g36mrnK6KzeTm2aijldrjytrj5diizs7doN7R4Nyj0snhndnao8vU3dfMndfKpN3U2tTKlNealNOKI6Oi1tnTh6fs>. 2005.
26. Espinosa, A. M. y cols. Modelación y simulación del árbol superior del molino de caña de azúcar. Rev. Centro Azúcar. Vol 38, n° 1, p. 20-32. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=65162762&lang=es&site=ehost-live>. ISSN 2223-4861. 2011.
27. Gil, J. A.; Gil, J. M. y Suárez, W. Capacidad de retención del jugo por el bagazo. Rev. Tecnológica Química. Vol 19, n° 1, p. 63-66. Disponible en: <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/download/1731/1271>. ISSN 2224-6185. 1999.
28. Gil, J. M. Estudio del efecto de los surfactantes en el agua de imbibición de los molinos sobre el % pol y % de humedad del bagazo. Tesis de Maestría. Universidad de Las Villas. 1998.
29. Gil, J. M. Intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar con el uso de surfactantes aniónicos en el agua de imbibición. Disponible en: <http://www.eumed.net/tesis/2011/jmgo/index.htm>. 2011.
30. Gil, J. M.; GIL, J. A. y SUÁREZ, W. Estudio de la compresibilidad del bagazo a escala de laboratorio. Rev. Tecnológica Química. Vol 18, n° 1, p. 69-74. Disponible en: <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/1606/1182>. 1998.
31. Gil, J. M.; Gil, J. A. y Suárez, W. Efecto de la adición del jabón b al agua de imbibición y el nivel de imbibición sobre el por ciento de pol en bagazo. Rev. Tecnología Química. Vol 20, n° 3, p. 83-88. Disponible en: <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/issue/view/218>. ISSN: 2224-6185. 2000a.
32. Gil, J. M. y cols. Evaluación del consumo de potencia del motor eléctrico del sexto molino de un tándem cañero. Rev. Académica de Investigación "TLATEMOANI". n° 5, p. 1-5. Disponible en: <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/05/ogcsp.htm>. ISSN 1989-9300. 2011.
33. Gil, J. M. y cols. Efecto del surfactante sulker flocc en el agua de imbibición sobre la extracción del jugo en una prensa de laboratorio. Rev. Tecnología Química. Vol 20, n° 2, p. 82-84. Disponible en: <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/1809/1354>. ISSN: 2224-6185. 2000b.

34. Gómez, J. R.; Armas, M. A. y Lozano, A. G. Competitividad y eficiencia en las oportunidades de ahorro de energía eléctrica en la industria azucarera. Rev. Centro Azúcar. Vol 33, nº 1, p. 75-82. Disponible en: <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2006/1/13.pdf>. ISSN 2223-4861. 2006.
35. González, F.; Castellanos, J. A. y Puertas, J. F. Método para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en la industria de azúcar de caña. Rev. Ingeniería mecánica. vol 13, nº 1, p. 41-48. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/31/351>. 2010.
36. Gonzalo, J.; Ramírez, J. M. y Rosero, E. Modelado del tren de molinos de un ingenio azucarero. XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático. Disponible en: <http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=125&sessionId=66&resId=0&materialId=paper&confId=47>. 2008.
37. Goytisolo, R. A.; Noa, J. G. y Arzola, N. Elevación de la eficiencia de extracción de jugo de caña en los molinos de caña de azúcar. 7mo. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente. ISBN 978-959-257-323-9. 2012.
38. Hamill, T. M. Wet milling extraction process and apparatus therefor. Patente 3695931. United States Patent Office. Disponible en: <http://www.google.com/patents/US3695931>. 1972.
39. Honig, P. Principios de tecnología azucarera. La Habana. 69-71, 192-195. 1979.
40. Hugot, E. y Jenkins, G. H. Handbook of cane sugar engineering. Amsterdam. ISBN: 9780444424389. Disponible en: <http://books.google.es/books?id=hNdxQgAACAAJ>. 1986.
41. Inskip, S. T. Cane preparation. Optimised technology. Proc Int Soc Sugar Cane Technol. p. 1-12. Vol 27. Disponible en: <http://pdf.thepdfportal.com/PDFFiles/10693.pdf>. 2010.
42. Jairo, J.; Sandro, J. y León, A. Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña de azúcar. Rev. Dyna. Vol 71, nº 144, p. 1-8. Disponible en: [https://eime.univalle.edu.co/gimi/Estudio\\_tribologico.pdf](https://eime.univalle.edu.co/gimi/Estudio_tribologico.pdf). ISSN 0012-7353. 2004.
43. Jáuregui, S.; Vélez, J. A. y Herrera, I. Modelación matemática para los accionamientos del tren de molinos de la caña de azúcar. Primer seminario nacional de cátedras azucareras de las universidades cubanas. ISBN: 959-16-0257-7. 2004.
44. Jenkins, G. Introducción a la tecnología del azúcar de caña. La Habana. p. 23-24, 54-56, 77-79, 83-89, 127-141, 143-152, 156-157, 173-192, 195-202. 1971.
45. Kent, G. A. The effect of added water temperature on milling train operation and performance. Rev. Sugar Tech. Vol 13, nº 1, p. 1-6. Disponible en: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12355-011-0062-8>. ISSN 0974-0740. 2011.
46. Kent, G. A.; Kauppila, D. J. y Mckenzie, N. J. The effect of mill orientation angle on bagasse moisture content. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 1-17. Vol 34. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/50932/>. 2012.

47. Lafargue, F. y Rodríguez, C. Influencia de la velocidad de deslizamiento en el consumo de potencia de las chumaceras de los molinos de caña. Rev. Centro Azúcar. Vol 2, p. 33-36. ISSN 2223-4861. 2001.
48. Lavarack, B. P. y cols. Improving the energy efficiency of sugar factories. Case study for pioneer mill. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 20-31. Vol. 26. Disponible en: [http://www.assct.com.au/media/pdfs/2004\\_G\\_08.pdf](http://www.assct.com.au/media/pdfs/2004_G_08.pdf). 2004.
49. Lewinski, J.; Grassmann, P. y Kallin, T. Torque y consumo de potencia en molinos azucareros de cuatro mazas. Congreso de la ISSCT en Sao Paulo. Disponible en: <http://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=2521&d=12591>. 2013.
50. Loughran, J. G. Mathematical and experimental modelling of the crushing of prepared sugar cane. PhD. University of Queensland. Disponible en: <http://eprints.jcu.edu.au/1239>. 1990.
51. Loughran, J. G. y Kannapiran, A. Finite element modelling of the crushing of prepared cane and bagasse. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. Vol 4. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/12510/1/12510.pdf>. 2002.
52. Lloyd, T.; Eastment, S. y Mitchell, P. Milling train maceration control utilising nir technology. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 688-695. vol 32. Disponible en: <http://www.assct.com.au/media/pdfs/M%2016%20Lloyd.pdf>. 2010.
53. Mann, A. P. Predicting the effects of fuel properties on combustion performance. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 629-637. Vol 32. Disponible en: <http://www.assct.com.au/media/pdfs/M%2008%20Mann.pdf>. 2010.
54. Mendoza, A. y cols. Modelación del contacto entre dos pares de dientes en las coronas de molinos de caña. Rev. Ingeniería mecánica. Vol 16, nº 3, p. 178-185. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/462>. ISSN 1815-5944. 2013.
55. Morejón, Y. y Revé, J. Influencia de la preparación de caña de azúcar a moler en la producción de azúcar en el complejo agroindustrial azucarero Manuel Fajardo. Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol 22, nº 1, p. 16-19. Disponible en: <http://www.rcta.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/download/186/pdf>. ISSN 1010-2760. 2013.
56. Moya, J. L. y cols. Modelación dinámica de los molinos de caña de azúcar. Rev. Centro Azúcar. Vol 38, nº 4, p. 53-59. Disponible en: <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2011/4/9.pdf>. ISSN 2223-4861. 2011.
57. Murry, C. R. Some teorical trends in the extraction performance of crushing trains. 32 Conference Proceedings QSSCT. 1965.
58. Murry, C. R. Computer aided studies of crushing train performance. 32 Conference Proceedings QSSCT. 1971.
59. Murry, C. R. A short course in crushing sugar cane. Australia. 1996.

60. Murry, C. R. y Holt, J. E. The mechanics of crushing sugar cane. Elsevier Publishing Company. Disponible en: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:244919>. 1967.
61. Nápoles, J. O. y cols. Consumo de energía eléctrica en el sexto molino de la empresa azucarera "Antonio Guiteras". Conferencia Internacional de Ingeniería Eléctrica FIE. ISBN 84-00-08424-1. 2006.
62. Nawi, N. M. y cols. Prediction and classification of sugar content of sugarcane based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. Biosystems Engineering. Vol 115, nº 2, p. 154 -161. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110>. ISSN 1537-5110. 2013.
63. Nawi, N. M. y cols. Potential technologies to measure sugarcane quality in the field. International Conference of Agricultural Engineering. p. 1-6. Disponible en: [http://eprints.usq.edu.au/21604/2/MatNawi\\_Chen\\_Jensen\\_Baillie\\_CIGR\\_2012\\_A\\_V.pdf](http://eprints.usq.edu.au/21604/2/MatNawi_Chen_Jensen_Baillie_CIGR_2012_A_V.pdf). 2012.
64. Noa, J. G.; Goytisoló, R. y Chou, R. Ahorro de energía para diferentes variantes de accionamiento hidráulico de los molinos de caña de azúcar. p. 1-11. Disponible en: <http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/revistas/archives/HASH8631.dir/doc.pdf>. 2007.
65. Oliver, G.; Buchanan, V. y Cooke, K. A tribological study for an increased coefficient of friction in the extraction of sugarcane juice. Rev. Tribology Transactions. Vol 50, p. 198-204. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aci&AN=501402570&lang=es&site=ehost-live>. ISSN 1547-357X. 2007.
66. Ortíz, F. y cols. Disminución de pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero. Rev. Ingeniería Industrial. vol 38, nº 4, p. 1-23. Disponible en: <http://academiajournals.com/downloads/OrtizTobon.pdf>. ISSN 1940-2163. 2008.
67. Pávlov, K. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Moscú. 1981.
68. PCC. Discurso pronunciado por Fidel Castro Ruz, presidente de la República de Cuba, en ocasión del aniversario 47 de su entrada en Pinar del Río, en el acto por la culminación del montaje de los grupos electrógenos en esa provincia. 2006. Disponible en: <http://www.cuba.cu/gobierno/discursos/2006/esp/f170106e.html>.
69. PCC. Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2011/05/folleto-lineamientos-vi-cong.pdf>. 2011.
70. Peacock, S. D. y Cole, M. A. Optimising imbibition in a sugar mill with cogeneration. Proceedings of The South African Sugar Technologists Association. p. 331-341. Vol. 82. Disponible en: <http://www.cabdirect.org/abstracts/20113014111.html>. 2009.
71. Pedrosa, P. R. Fabricación de azúcar crudo de caña. La Habana. p. 42-50. 1975.
72. Peña, E. Evaluación de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios a escala industrial en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Jorge Michel Corrales Suárez, Tutor. Trabajo de Diploma. Puerto Padre. Universidad de Las Tunas. 2013.

73. Pérez, E.; Hidalgo, P. P. y Azaret, A. Determinación del consumo de potencia en el molino de una planta piloto. Rev. Centro Azúcar. Vol 31, nº 1, p. 64-67. ISSN 2223-4861. 2004.
74. Pérez, E. E. Análisis de la correlación entre el consumo de potencia en un molino de caña de azúcar y las variables operativas del mismo. Dr. Jorge L Moya Rodríguez y Dr. Evelio Rodríguez González, Tutores. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Las Villas. 2003.
75. Pérez, S. R. Intensificación del proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar con el empleo de agua magnetizada. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Oriente. 1992.
76. Quincoses, M. Propiedades físico-químicas y comportamiento tecnológico de las sustancias nitrogenadas en el proceso de fabricación de azúcar crudo de caña. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Las Villas. 1989.
77. Quintero, H. y Peralta, L. M. Modelación del proceso de extracción de jugos de caña en la planta piloto "José Martí". Rev. Centro Azúcar. Vol. 32, nº 3, p. 14-17. ISSN 2223-4861. 2005.
78. Riera, G. La extracción en un tren de molinos. Tesis para el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISPJAE. 1996.
79. Rodríguez, A.; Rodríguez, C. y Alvarez, E. Fricción en las coronas de molinos de caña. Rev. Ingeniería mecánica. Vol 1, nº 1, p. 33-37. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/407/764>. ISSN 1815-5944. 1998.
80. Rosero, E. y Ramirez, J. Modelado y control de molinos de caña de azúcar usando accionamientos eléctricos. Rev. Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Vol 6, nº 3, p. 44-53. Disponible en: <http://zl.elsevier.es/es/revista/revista-iberoamericana-automatizada-e-informatica-331/pdf/90083496/S300/>. ISSN 1697-7912. 2009.
81. Rosero, E. E. Modelado y control de molinos de caña de azúcar. Dr. José Miguel Ramírez, Tutor. Tesis para el grado científico de Master en Ingeniería con énfasis en Automática. Universidad del Valle. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791209702638>. 2006.
82. Russel, G. E. An investigation of the extraction performance of sugar cane crushing train. Ph.D. Thesis. University of Queensland. 1968.
83. Sanfiel, F. P. y cols. Manual analítico de control unificado para la producción de azúcar crudo. La Habana. 2004.
84. Sevilla, E. La utilización de las técnicas de análisis de proceso en la identificación de un tren de molinos. Tesis para el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISPJAE. 1982.
85. Sevilla, E. y Friedman, P. Un método teórico para determinar los coeficientes de reabsorción e imbibición en un tren de molinos de caña. Rev. Cuba Azúcar. Abril/Junio, 1977. P. 52-60.
86. Silva, J. M. y cols. Diagnóstico energético en la empresa azucarera Antonio Guiteras. Rev. Centro Azúcar. Vol 37, nº4, p. 8-14. Disponible en: <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2010/4/2.pdf>. ISSN 2223-4861. 2010.

87. Solomon, T. J. Theoretical and experimental studies in the mechanics of crushing sugar cane. Ph.D. Thesis. University of Queensland. Disponible en: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:244919>. 1967.
88. Spencer, E. y Meade, G. Manual del azúcar de caña. La Habana. p. 50-77, 80-86. 1974.
89. Suárez, L. D. y cols. Efficiency increase in the extraction of sugar cane mills by means of the regulation of hydraulic pressures. Disponible en: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2005/Fullpapers/03440.pdf>. 2005.
90. Suárez, R. R. y cols. El almacenamiento de bagazo para la industria de derivados. La Habana. 6-14, 32. 1982.
91. Thaval, O. P. Modeling the flow of cane constituents through the milling process of a raw sugar factory. Master of applied science. University Queensland. Disponible en: [http://eprints.qut.edu.au/60915/1/Omkar\\_Thaval\\_Thesis.pdf](http://eprints.qut.edu.au/60915/1/Omkar_Thaval_Thesis.pdf). 2012.
92. Thaval, O. P. y Kent, G. Modelling the flow of juice through a mill. Proceedings of The South African Sugar Technologists Association. p. 484-489. Vol 85. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/58521/>. 2012a.
93. Thaval, O. P. y Kent, G. A. An enhanced mill extraction model. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists. Vol 34. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/50930/>. 2012b.
94. Thaval, O. P. y Kent, G. A. Modeling the flow of cane constituents in the milling process. Proceedings of The South African Sugar Technologists Association. p. 435-453. Disponible en: <http://eprints.qut.edu.au/53324/>. 2012c.
95. Treybal, R. Operaciones con transferencia de masa. Madrid. p. 19-23, 44-63, 73-82, 96-100, 191-194, 482-484, 721-770. ISBN 968 6046 34 8. 1977.
96. Valdés, A. y Vázquez, C. Alternativas para el calentamiento simultáneo del jugo mezclado y el enfriamiento del agua de imbibición. Rev. Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba. n° 2, p. 33-37. Disponible en: <http://www.actaf.co.cu/revistas/ATAC/ATAC3-2008/08Calentamiento.pdf>. ISSN 0138-7553. 2008.
97. Vélez, J. A. y Jáuregui, S. L. Consideraciones teóricas sobre el análisis de consumo de potencia de un tándem de molinos azucarero con accionamiento eléctrico y transmisión mecánica. Rev. Centro Azúcar. Vol 33, n°2, p. 70-74. Disponible en: <http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2006/2/11.pdf>. ISSN 2223-4861. 2006.
98. Vélez, J. A. y Moya, J. L. Consideraciones teóricas sobre el análisis de consumo de potencia de un tándem de molino azucarero con accionamiento eléctrico y transmisión hidráulica. Rev. Centro Azúcar. Vol 32, n°4, p. 54-56. ISSN 2223-4861. 2005.
99. Verdecia, M. Evaluación de las presiones hidráulicas de los molinos intermedios a escala industrial en el proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Ing. Jorge Michel Corrales Suárez, Tutor. Trabajo de Diploma. Majibacoa. Universidad de Las Tunas. 2013.
100. Wienese, A. The effect of imbibition and cane quality on the front end mass balance. Proceedings of The South African Sugar Technologists Association.

Disponibile en: [http://www.sasta.co.za/wp-content/uploads/Proceedings/1990s/1995\\_Wienese\\_The%20Effect%20Of%20Imbibition.pdf](http://www.sasta.co.za/wp-content/uploads/Proceedings/1990s/1995_Wienese_The%20Effect%20Of%20Imbibition.pdf). 1995.

## **ANEXOS**

## ANEXOS

**Anexo 1:** Valores de las variables dependientes cuando se preparó la caña con dos juegos de cuchillas.

<b>Humedad (%)</b>	<b>Pol (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Potencia T (MW)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Pol (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Potencia T (MW)</b>
51,74	2,52	55,00	2,98	51,30	2,23	52,00	3,04
52,62	3,06	53,00	2,92	51,45	2,40	68,00	3,08
52,90	2,65	62,33	2,85	50,27	2,20	64,00	3,00
52,44	2,54	54,00	2,85	50,23	2,17	58,00	2,92
52,20	2,48	54,50	2,95	50,22	2,23	64,00	2,88
52,55	2,68	59,50	2,97	50,08	2,30	61,00	3,03
52,06	2,37	50,00	2,90	51,63	2,34	69,00	3,01
52,18	2,49	52,00	2,83	51,14	2,24	62,00	3,00
51,80	2,37	59,00	2,85	50,50	2,33	61,00	3,05
51,05	2,32	49,00	2,84	50,46	2,27	62,00	2,92
51,69	2,36	56,00	3,04	49,80	2,15	62,00	2,99
50,95	2,38	56,00	3,01	50,67	2,25	62,50	2,90
52,50	2,35	53,50	3,06	50,00	2,25	62,50	2,91
52,00	2,26	50,00	2,90	49,70	2,17	64,00	2,87
52,33	2,35	52,00	2,81	50,33	2,53	61,00	3,04
52,16	2,34	63,00	2,86	50,49	2,38	66,00	2,91
52,22	2,42	54,00	2,84	49,71	2,21	60,00	3,02
52,27	2,45	66,00	2,89	50,40	2,18	60,00	2,92
51,48	2,35	59,00	2,96	50,76	2,31	66,00	2,89
51,92	2,26	52,00	2,94	49,93	2,44	66,00	2,85
51,88	2,66	61,00	2,93	49,90	2,25	62,50	3,05
52,32	2,56	57,00	2,97	50,84	2,32	62,50	2,97
51,30	2,17	61,00	2,95	50,53	2,50	64,00	2,95
50,77	2,31	66,00	2,92	50,47	2,24	64,00	2,94
51,07	2,21	66,00	2,83	49,72	2,48	69,00	3,04
52,53	2,32	57,50	3,05	51,10	2,24	64,00	3,05
51,18	2,28	68,00	3,01	50,30	2,40	64,00	3,01
51,17	2,14	55,00	3,05	50,65	2,31	64,00	2,98
52,42	2,26	55,00	3,04	50,20	2,50	65,00	2,95

**Anexo 2:** Valores de las variables dependientes cuando se preparó la caña con tres juegos de cuchillas.

<b>Humedad (%)</b>	<b>Pol (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Potencia T (MW)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Pol (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Potencia T (MW)</b>
50,47	2,17	68,00	2,82	50,73	2,22	63,00	2,97
49,27	2,20	84,00	2,90	49,95	2,41	71,00	2,87
49,95	2,29	79,00	2,97	51,22	2,17	61,00	2,85
50,27	2,27	69,00	2,99	50,48	2,15	74,00	3,01
50,13	2,22	74,00	2,86	50,00	2,18	66,00	2,80
50,00	2,24	71,00	2,88	51,48	2,11	60,00	2,81
50,31	2,35	78,00	2,78	50,64	2,32	71,00	2,79
49,84	2,38	80,00	2,82	49,73	2,24	68,00	2,80
49,73	2,28	66,00	2,81	50,90	2,14	77,00	2,94
50,63	2,18	71,00	2,90	49,78	2,12	82,00	2,88
50,82	2,30	79,00	3,03	49,65	2,12	60,00	3,00
50,58	2,31	75,00	2,92	50,00	2,08	79,00	2,83
51,67	2,35	76,00	2,80	49,53	2,20	74,00	2,79
51,47	2,32	82,00	2,83	49,87	2,15	66,00	2,83
50,28	2,29	77,50	2,87	51,50	2,43	69,00	2,84
50,70	2,29	79,50	2,88	50,60	2,36	76,00	2,85
50,10	2,35	85,00	2,95	50,36	2,12	62,00	2,93
50,28	2,20	71,00	2,81	50,80	2,15	65,00	2,95
50,15	2,29	69,50	2,90	50,71	2,15	62,00	2,81
50,12	2,39	79,50	2,85	50,03	2,18	67,50	2,79
51,62	2,39	77,50	2,84	49,56	2,22	70,00	2,82
49,93	2,43	82,00	3,01	51,02	2,28	82,00	2,80
50,90	2,29	79,00	2,89	50,43	2,31	82,00	2,83
49,82	2,23	81,00	2,81	49,62	2,20	77,00	2,81
52,40	2,33	81,00	3,03	49,58	2,26	77,00	2,82
51,05	2,38	81,00	3,01	49,54	2,06	70,00	2,97
49,40	2,32	85,00	2,81	49,53	2,16	72,00	2,95
50,88	2,45	79,00	2,83	49,65	2,12	79,00	2,79
50,70	2,45	79,00	2,86	49,70	2,29	68,00	2,86
51,80	2,38	79,00	2,93				

**Anexo 3:** Resultados experimentales obtenidos para las variables dependientes en el diseño factorial para el estudio del efecto de la imbibición sobre el % pol y % humedad del bagazo final a escala industrial.

No	Bloque	Temperatura de imbibición	Flujo de imbibición	Pol (%)	Humedad (%)	Molida horaria (t/h)
1	1	1	-1	2,99	49,40	390,20
2	1	-1	-1	3,20	49,80	388,75
3	1	-1	1	2,24	50,80	397,45
4	1	0	0	2,50	51,20	399,35
5	1	1	1	2,01	51,60	399,25
6	1	0	0	2,46	51,00	399,45
7	2	1	-1	2,93	50,00	385,32
8	2	-1	-1	3,04	50,00	310,50
9	2	-1	1	2,32	50,80	306,25
10	2	0	0	2,56	51,40	392,69
11	2	1	1	2,03	49,80	386,10
12	2	0	0	2,44	50,80	392,65

**Anexo 4:** Análisis de varianza del efecto de los parámetros de imbibición sobre el porcentaje de pol.

Análisis de la Varianza para Pol					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Temperatura de imb	0,0882	1	0,0882	11,17	0,0124
B:Flujo de imbibició	1,5842	1	1,5842	200,65	0,0000
AB	0,005	1	0,005	0,63	0,4523
bloques	0,000533333	1	0,000533333	0,07	0,8024
Error Total	0,0552667	7	0,00789524		
-----					
Total (corr.)	1,7332	11			
R-cuadrado = 96,8113 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,6155 por ciento					
Error Estándar de Est. = 0,0888552					
Error absoluto de la media = 0,0561111					
Estadístico Durbin-watson = 1,96416 (P=0,3678)					
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,129071					

**Anexo 5:** Análisis de varianza del efecto de los parámetros de imbibición sobre el porcentaje de humedad del bagazo residual.

Análisis de Varianza para humedad					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura de imbibición	0,045	1	0,045	0,08	0,7804
B: Flujo de imbibición	1,805	1	1,805	3,37	0,1091
AB	0,005	1	0,005	0,01	0,9258
bloques	0,0833333	1	0,0833333	0,16	0,7051
Error total	3,75167	7	0,535962		
Total (corr.)	5,69	11			

R-cuadrada = 34,0656 por ciento  
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 9,34022 por ciento  
Error estándar del est. = 0,732088  
Error absoluto medio = 0,475  
Estadístico Durbin-Watson = 2,25246 (P=0,5670)  
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,198801

**Anexo 6:** Resultados experimentales obtenidos para las variables dependientes con la caña preparada con dos y tres juegos de cuchillas respectivamente.

No	Bloque	Molinos				Pol (%)		Humedad (%)		Potencia (MW)	
		2	3	4	5	Dos	Tres	Dos	Tres	Dos	Tres
1	1	1	1	1	-1	2,90	3,46	54,00	50,00	4,25	4,11
2	1	1	1	-1	-1	2,90	3,07	52,00	49,20	4,11	3,82
3	1	-1	1	-1	1	2,89	2,15	53,00	51,80	4,01	3,83
4	1	1	-1	-1	-1	3,10	2,96	52,40	52,20	3,78	3,55
5	1	-1	1	1	1	3,30	3,33	50,00	50,20	4,28	4,06
6	1	1	-1	1	-1	3,00	3,10	52,80	50,40	4,05	3,74
7	1	1	-1	1	1	3,10	2,54	53,00	51,20	4,31	4,02
8	1	-1	-1	1	1	3,00	3,12	53,00	51,40	3,98	3,78
9	1	-1	1	1	-1	2,60	3,20	52,70	49,20	4,02	3,84
10	1	0	0	0	0	2,96	2,01	52,80	49,80	4,04	3,73
11	1	1	1	1	1	3,30	2,65	52,20	52,00	4,53	4,35
12	1	-1	-1	1	-1	3,00	2,53	52,90	49,80	3,83	3,48
13	1	0	0	0	0	2,90	3,18	52,40	51,40	4,05	3,72
14	1	-1	-1	-1	-1	3,35	2,22	51,00	52,80	3,56	3,27
15	1	-1	-1	-1	1	2,67	2,52	52,80	53,00	3,74	3,49
16	1	1	-1	-1	1	2,86	2,68	51,20	53,80	4,05	3,81
17	1	0	0	0	0	3,36	2,78	53,00	52,00	4,04	3,78
18	1	-1	1	-1	-1	2,87	3,23	53,00	50,00	3,83	3,51
19	1	0	0	0	0	2,89	3,18	52,80	51,40	3,99	3,79
20	1	1	1	-1	1	3,10	2,12	50,40	51,40	4,31	4,05
21	1	0	0	0	0	3,31	2,98	52,30	50,40	4,11	3,81
22	2	1	1	1	-1	2,97	3,02	52,20	50,40	4,23	4,04
23	2	1	1	-1	-1	2,94	2,62	53,00	49,20	4,06	3,80
24	2	-1	1	-1	1	2,86	3,14	52,80	50,60	4,04	3,83
25	2	1	-1	-1	-1	2,81	2,52	52,60	51,30	3,75	3,50
26	2	-1	1	1	1	3,05	2,94	52,50	51,10	4,33	4,01
27	2	1	-1	1	-1	2,91	2,70	52,40	52,40	4,04	3,77
28	2	1	-1	1	1	3,20	3,05	52,60	51,80	4,24	4,11
29	2	-1	-1	1	1	2,90	2,96	53,00	50,30	3,98	3,77
30	2	-1	1	1	-1	3,04	2,56	52,30	51,30	4,07	3,83
31	2	0	0	0	0	2,99	2,81	53,00	50,80	4,04	3,72
32	2	1	1	1	1	2,90	3,03	52,60	51,70	4,49	4,40
33	2	-1	-1	1	-1	3,05	3,15	51,40	50,20	3,84	3,48
34	2	0	0	0	0	2,80	2,88	52,70	51,80	4,04	3,75
35	2	-1	-1	-1	-1	2,95	2,63	52,80	50,40	3,60	3,32
36	2	-1	-1	-1	1	3,06	3,20	51,70	50,20	3,79	3,51
37	2	1	-1	-1	1	3,20	2,75	51,00	50,00	3,97	3,81
38	2	0	0	0	0	3,34	3,04	52,70	51,30	4,01	3,76
39	2	-1	1	-1	-1	3,10	3,17	50,20	50,40	3,86	3,48
40	2	0	0	0	0	2,93	2,78	53,10	50,50	4,04	3,75
41	2	1	1	-1	1	3,10	3,30	53,00	51,20	4,29	4,13
42	2	0	0	0	0	3,30	2,90	52,90	50,20	4,06	3,77

**Anexo 7:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre el por ciento pol con dos juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Pol					
Fuente	suma de Cuadrados	G <sup>l</sup>	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	0,01125	1	0,01125	0,31	0,5841
B:Molino 3	0,0036125	1	0,0036125	0,10	0,7560
C:Molino 4	0,0066125	1	0,0066125	0,18	0,6744
D:Molino 5	0,03125	1	0,03125	0,85	0,3637
AB	0,00125	1	0,00125	0,03	0,8549
AC	0,0002	1	0,0002	0,01	0,9417
AD	0,0666125	1	0,0666125	1,81	0,1882
BC	0,0006125	1	0,0006125	0,02	0,8981
BD	0,0578	1	0,0578	1,57	0,2194
CD	0,07605	1	0,07605	2,07	0,1605
bloques	0,0000380952	1	0,0000380952	0,00	0,9745
Error Total	1,10196	30	0,036732		
<b>Total (corr.)</b>	<b>1,35725</b>	<b>41</b>			
R-cuadrado = 18,8092 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 por ciento					
Error Estándar de Est. = 0,191656					
Error absoluto de la media = 0,126261					
Estadístico Durbin-watson = 1,8043 (P=0,1923)					
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,061926					

**Anexo 8:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre el porcentaje de pol con tres juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Pol					
Fuente	suma de Cuadrados	gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	0,0072	1	0,0072	0,06	0,8158
B:Molino 3	0,17405	1	0,17405	1,33	0,2570
C:Molino 4	0,292613	1	0,292613	2,24	0,1444
D:Molino 5	0,0136125	1	0,0136125	0,10	0,7489
AB	0,0055125	1	0,0055125	0,04	0,8385
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,125	1	0,125	0,96	0,3353
BC	0,00245	1	0,00245	0,02	0,8919
BD	0,22445	1	0,22445	1,72	0,1994
CD	0,0066125	1	0,0066125	0,05	0,8234
Error Total	4,04586	31	0,130512		
<b>Total (corr.)</b>	<b>4,89736</b>	<b>41</b>			

R-cuadrado = 17,3869 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0,361264  
Error absoluto de la media = 0,247126  
Estadístico Durbin-watson = 2,09797 (P=0,3600)  
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0613623

**Anexo 9:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre el por ciento de humedad en el bagazo final con dos juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Humedad					
Fuente	suma de Cuadrados	gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	0,165312	1	0,165312	0,21	0,6509
B:Molino 3	0,0153125	1	0,0153125	0,02	0,8903
C:Molino 4	1,40281	1	1,40281	1,77	0,1930
D:Molino 5	0,262813	1	0,262813	0,33	0,5686
AB	0,382813	1	0,382813	0,48	0,4920
AC	1,01531	1	1,01531	1,28	0,2662
AD	1,95031	1	1,95031	2,47	0,1269
BC	0,632813	1	0,632813	0,80	0,3782
BD	0,262813	1	0,262813	0,33	0,5686
CD	0,0153125	1	0,0153125	0,02	0,8903
bloques	0,0152381	1	0,0152381	0,02	0,8905
Error Total	23,7306	30	0,791019		
-----					
Total (corr.)	29,8514	41			
R-cuadrado = 20,5044 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 por ciento					
Error Estándar de Est. = 0,889392					
Error absoluto de la media = 0,600198					
Estadístico Durbin-watson = 2,11705 (P=0,2664)					
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,076416					

**Anexo 10:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre el por ciento de humedad en el bagazo final con tres juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Humedad					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	1,66531	1	1,66531	1,85	0,1840
B:Molino 3+bloque	2,94031	1	2,94031	3,26	0,0808
C:Molino 4+bloque	0,165313	1	0,165313	0,18	0,6714
D:Molino 5+bloque	3,57781	1	3,57781	3,97	0,0554
AB	0,227812	1	0,227812	0,25	0,6187
AC	2,58781	1	2,58781	2,87	0,1004
AD	0,0903125	1	0,0903125	0,10	0,7537
BC	3,18781	1	3,18781	3,54	0,0697
BD	1,24031	1	1,24031	1,38	0,2498
CD	0,165312	1	0,165312	0,18	0,6714
bloques	1,56214	1	1,56214	1,73	0,1978
Error Total	27,0176	30	0,900586		
-----					
Total (corr.)	44,4279	41			
R-cuadrado = 39,1877 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 19,5709 por ciento					
Error Estándar de Est. = 0,948992					
Error absoluto de la media = 0,653741					
Estadístico Durbin-watson = 1,36852 (P=0,0114)					
Autocorrelación residual Lag 1 = 0,298519					

**Anexo 11:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre la demanda de potencia del tándem con dos juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Potencia					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	0,63845	1	0,63845	384,52	0,0000
B:Molino 3	0,68445	1	0,68445	412,22	0,0000
C:Molino 4	0,5202	1	0,5202	313,30	0,0000
D:Molino 5	0,610513	1	0,610513	367,69	0,0000
AB	0,0003125	1	0,0003125	0,19	0,6675
AC	0,0001125	1	0,0001125	0,07	0,7964
AD	0,00245	1	0,00245	1,48	0,2339
BC	0,0028125	1	0,0028125	1,69	0,2030
BD	0,00005	1	0,00005	0,03	0,8634
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
bloques	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
Error Total	0,0498119	30	0,0016604		
<b>Total (corr.)</b>	<b>2,50916</b>	<b>41</b>			
R-cuadrado = 98,0148 por ciento R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97,3744 por ciento Error Estándar de Est. = 0,040748 Error absoluto de la media = 0,0291071 Estadístico Durbin-watson = 2,06511 (P=0,3220) Autocorrelación residual Lag 1 = -0,0526537					

**Anexo 12:** Análisis de varianza del efecto de la disminución de las presiones hidráulicas sobre la demanda de potencia del tándem con tres juegos de cuchillas.

Análisis de la Varianza para Potencia					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:Molino 2	0,427812	1	0,427812	385,14	0,0000
B:Molino 3+bloque	0,55125	1	0,55125	496,27	0,0000
C:Molino 4+bloque	0,43245	1	0,43245	389,32	0,0000
D:Molino 5+bloque	0,374113	1	0,374113	336,80	0,0000
AB	0,00005	1	0,00005	0,05	0,8334
AC	0,0002	1	0,0002	0,18	0,6744
AD	0,0045125	1	0,0045125	4,06	0,0529
BC	0,0036125	1	0,0036125	3,25	0,0814
BD	0,0018	1	0,0018	1,62	0,2128
CD	0,0008	1	0,0008	0,72	0,4028
bloques	0,000238095	1	0,000238095	0,21	0,6467
Error Total	0,0333238	30	0,00111079		
-----					
Total (corr.)	1,83016	41			
R-cuadrado = 98,1792 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97,5918 por ciento					
Error Estándar de Est. = 0,0333286					
Error absoluto de la media = 0,0221173					
Estadístico Durbin-watson = 2,22696 (P=0,1667)					
Autocorrelación residual Lag 1 = -0,122532					