

*UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA
ABREU” DE LAS VILLAS*

*FACULTAD DE INGENIERIA
MECANICA*

DEPARTAMENTO DE MAD

TRABAJO DE DIPLOMA

Título:

*“Eficiencia tecnológica y energética en el
tandem del CAI “Melanio Hernández”*

Autor: Clotilde Cárdenas Méndez

Tutor: MSc. Ing. Eusebio Pérez Castellanos

Santa Clara, 2003

Resumen

RESUMEN

El objeto de estudio de este trabajo fue el CAI “Melanio Hernández” ubicado en la provincia de Sancti Spíritus, municipio Taguasco; con vistas a mejorar la eficiencia tecnológica y mecánica de este ingenio. En este trabajo se llevaron a cabo varias mediciones en el área de manipulación, preparación y tandem. Esto se realizó para la caña azucarera y para la caña energética aunque de esta última se obtuvieron muy pocos datos debido a las pocas horas de molienda de la misma. En el laboratorio se obtuvieron los resultados de fibra de entrada, bagazo % caña, humedades de salida y fibra dura/meollo. Como resultado final se realizó un análisis económico sobre la incidencia económica en una zafra debida al incremento en las pérdidas de pol en bagazo. Con respecto a la eficiencia mecánica se llevaron a cabo los cálculos de potencia por el Diagnóstico desarrollado por Pérez y se compararon con las reales tomadas en el tandem para los motores 3 y 1. Por otra parte se calculó la capacidad por el método del manual de Planta Moledora y por el desarrollado por Pérez se comparó con la real del tandem. y se hizo un análisis acerca de la influencia de algunas variables como el diámetro de las mazas, la velocidad angular y la fuerza hidráulica total sobre el consumo de potencia, la capacidad, los consumos específicos y la eficiencia mecánica.

Abstract

ABSTRACT

The object of study of this work was the sugar industry "Melanio Hernández " located in the county of Sancti Spíritus, municipality Taguasco, in order to improve their technological efficiency and mechanics . In this work they were carried out several measurements in the area of manipulation, preparation and mill. This was carried out for the sugar cane and for the energy cane although very few data were obtained of this one, due to the few hours of milling operation with this tipe of cane. In the laboratory the results of entrance fiber, bagasse % cane, exit humidities and others were obtained. As a final result an analysis about the economic incidence in this year due to the increment in the pol losses in bagasse was carried out. With regard to the mechanical efficiency the calculations of power were made by the Diagnosis developed by Pérez and they were compared with the real ones taken in the tandem for the motors 3 and 1. On the other hand the capacity was calculated by the method of the Manual de Planta Moledora and for the one developed by Pérez and they was compared with the real of the tandem. On the other hand an analysis was made about the influence of some variables as the diameter of the rolls , the angular speed and the total hydraulic force over the consumption of power, the capacity, the specific consumptions and the mechanical efficiency.

Indice.

INDICE

INTRODUCCION.

Introducción.....pag.

1

- Problema Pag. 2
- Hipótesis Pag. 2
- Objetivos generales Pag. 2
- Objetivos Específicos Pag. 3
- Tareas desarrolladas Pag. 3

DESARROLLO.

CAPITULO #1: Antecedentes del trabajo.

Capítulo # 1.....pag.

4

- 1.1- Breve bosquejo histórico del CAI “Melanio Hernández” Pag. 4
- 1.2- Análisis Bibliográfico: Pag. 6
 - 1.2.1 Sobre la extracción. Pag. 6
 - 1.2.2 Sobre el consumo de potencia en los molinos. Pag.10
- 1.3 Memoria descriptiva
- Conclusiones parciales

CAPITULO #2:Análisis de la eficiencia tecnológica en el tandem.

Capítulo #

2.....pag.19

- 2.1.- Información necesaria. Pag.20
 - 2.1.1 Reporte de ajuste del tandem durante la zafra Pag.21
 - 2.1.2 Balance de materiales. Pag.21
 - 2.1.3 Extracción relativa . Pag.25
- 2.2 Métodos utilizados para las mediciones en la investigación y resultados obtenidos. Pag.26
 - 2.2.1-Método utilizado para el cálculo del índice de preparación y la densidad volumétrica Pag.28
 - 2.2.2-Método de laboratorio para la determinación de la preparación de la caña Pag.28
 - 2.2.3-Determinación del índice de preparación a partir de la densidad Pag.29

de la caña.	
2.3 -Fibra de entrada, bagazo % caña y humedad de salida del bagazo.	Pag.31
2.4 Granulometría del bagazo.	Pag.32
2.5 Algunos datos obtenidos para la caña energética.	Pag.34
2.6 Valoración económica	Pag.36
Conclusiones parciales	Pag.37

CAPITULO #3: Análisis de la eficiencia mecánica del tandem.

Capítulo #	
3.....	pag.39
3.1 Importancia del desarrollo de diagnósticos en un tandem.	Pag.39
3.2 Cálculo por el método de grueso del colchón (tomado de [42]).	Pag.40
3.2.1. Elementos a considerar para determinar el factor de grueso de colchón óptimo (Go).	Pag.41
3.2.2. Cálculo del factor de grueso de colchón óptimo (Go).	Pag.42
3.2.3. - Cálculo del factor de grueso de colchón real (Greal).	Pag.43
3.2.4.-Posibilidades de molida óptima (Mo).	Pag.44
3.2.5.-Diagnóstico de un tándem.	Pag.44
3.2.6 Aplicación del método para el tandem del CAI “Melanio Hernández”.	Pag.45
3.3 Cálculo por el método desarrollado por desarrollado por Pérez [].	Pag.47
3.4 Lecturas reales de consumo en el tandem.	Pag.51
3.2.1 Tendencias en el comportamiento de algunas variables del tandem.	Pag.53
Conclusiones parciales	Pag.55
CONCLUSIONES GENERALES	Pag.57
RECOMENDACIONES	Pag.58
BIBLIOGRAFÍA	Pag.59

Introducción

INTRODUCCIÓN.

La industria azucarera de Cuba y del mundo enfrenta en la actualidad un reto muy difícil de vencer: a pesar de ser una industria productora de alimentos se le ha planteado también la tarea de ser fuente importante de producción de energía eléctrica, con lo cual se reduce la contaminación ambiental que generan las plantas que operan con petróleo y al mismo tiempo se aumenta la rentabilidad de la producción del azúcar propiamente dicho.

Esta tarea se ha unido a la diversificación de la producción en otros sentidos donde juegan un importante papel los derivados tales como el alcohol y la torula entre otros. Los altos costos de producción debidos al encarecimiento de los insumos y los bajos precios del crudo han obligado al cierre de muchas unidades de producción en los países del tercer mundo. En los Estados Unidos y la Unión Europea se han implementado políticas proteccionistas con los productores internos que provocan una competencia desigual y ruinoso con los pequeños países que viven casi enteramente de su producción azucarera.

Cuba no escapa a esta situación y la misma se agrava por el hecho de que desde hace más 40 años sufre de un bloqueo por parte de Estados Unidos que le priva de fuentes de financiamiento importantes y en todo caso debe buscar dichas fuentes en sitios muy lejanos y que desde principios de la década de los 90 se produjo el derrumbe del campo socialista y la desintegración de la URSS, con lo que el país se vio privado de una gran parte de su comercio tradicional en las últimas cuatro décadas.

En el marco de esta situación se ha comenzado a llevar a cabo en Cuba la tarea “Alvaro Reynoso”. Sus tres principales vertientes son: el aumento de la eficiencia en la producción de azúcar, la producción de alimentos para la población en las tierras en que no se siembre más caña y la capacitación del personal.

En el marco de la primera vertiente se seleccionaron 71 centrales azucareros por sus condiciones técnicas y eficiencia, con áreas de caña de las mejores tierras, propias o agregadas, para alcanzar mayores rendimientos y costos competitivos, no superiores a 260 pesos (de ellos 60 en divisas) por Tm de azúcar .

Uno de los centrales escogidos para continuar moliendo fue el CAI “Melanio Hernández” , ubicado en la provincia de Sancti Spiritus, municipio Taguasco . En los últimos años el central ha sufrido cambios significativos como por ejemplo se ha electrificado el tandem, se instalaron dos turbo-generadores con una capacidad de 4 MW cada uno por lo que el mismo se auto abastece y entrega una parte al consumo nacional. Por otra parte cuenta con una destilería a la cual entrega alrededor de 15 ton/h de vapor .

Todos estos elementos hacen necesaria una valoración de la eficiencia energética con que se produce el azúcar y, dado el elevado consumo del tandem, es necesario tener una idea lo más exacta posible de la eficiencia de la molienda en los equipos de molienda de este central.

A todos estos aspectos se unió el hecho de que de una zafra para la otra se incrementó la pol en el bagazo a la salida del tandem desde 1,75 % hasta 2,5 % con relación al bagazo.

Problema:

Se hace necesario profundizar en el conocimiento de la eficiencia tecnológica y energética de los molinos de caña del CAI “ Melanio Hernández” con vistas a aumentar la eficiencia general de la fábrica.

Hipótesis.

Es posible determinar la eficiencia tecnológica y energética de este tandem y de cada una de sus unidades de molienda a partir de los elementos operacionales que intervienen en el proceso.

Objetivo General.

Determinar los valores de eficiencia tecnológica y energética en la molienda para el tandem del CAI “Melanio Hernández” y cada una de sus unidades. Con vistas a que el personal de la fábrica posea los elementos necesarios para aumentar estos valores y mejorar la rentabilidad en la producción de azúcar.

Objetivos Específicos.

- ✿ *Determinar los niveles de eficiencia tecnológica del tandem y de cada una de sus unidades, a partir de corridas periódicas de brix, con vistas a mejorar la extracción del tandem con vista establecer un régimen de operación que permita mejorar esos valores.*
- ✿ *Establecer un diagnóstico de la operación de los molinos que permita establecer una correlación entre las variables operativas mediante la cual se eleve la eficiencia energética del sistema.*

Tareas desarrolladas

- ✿ Se coordinó con la dirección de la fábrica la creación de un equipo de trabajo que desarrollara corridas de brix en el tandem. En estas corridas se incluyó una muestra de la caña preparada por las cuchillas, a la entrada del tandem.
- ✿ Se corrió el programa “Diagnóstico de molinos” con los datos del CAI “Melanio Hernández”.
- ✿ Se tomaron medidas con vistas a estabilizar la operación del tandem y en estas condiciones se midió la potencia consumida en los molinos.

Capítulo I

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES DEL TRABAJO.

1.1. Breve bosquejo histórico del CAI “Melanio Hernández”

La historia de este central se remonta al siglo XVII, en plena época colonial, al igual que muchos de los ingenios de la región.

En 1618 se le entrega a Maria Astorga Merced la orden por un lote de tierra a la orilla del río Tuinucú. En 1619 se amplía ese feudo en una extensión extraordinaria colindando con la hacienda Tuinucú llegando a ser esta instalación la principal suministradora de viandas y granos de la villa de Sancti Spíritus.

En 1721 existieron las primeras referencias de trapiche, produciéndose cajas de azúcar en su mayoría para auto consumo de la población de Sancti Spíritus. Ya en 1804 está fundado el ingenio por Tomás Padilla como propietario, con mano de obra esclava, sin muchas pretensiones de mecanización. Después de Padilla este ingenio pasó a manos de varios propietarios entre ellos Julio Yerman Cantero. En 1840 este ingenio tenía un prestigio económico por su notable producción para la época. La guerra de los diez años lo afecta mucho, son incendiados los cañaverales y el ingenio es destruido. Después de Cantero pasa una parte a manos de Fonty su hijo y a Argon y compañía radicados en Trinidad y Cienfuegos respectivamente. En 1888 pasa a manos de Joaquín Rionda Polledo al declararse la Argon en quiebra. Este ingenio se ve afectado y deterioradas sus instalaciones en la guerra de 1895, a pesar de poseer dos maquinarias de vapor, a la muerte de Joaquin Rionda. En 1891 se constituye la The Tuinucú Manufacturing Company que en 1893 se disuelve y se convierte en The Tuinucú Sugar Company fungiendo como presidente Manuel Rionda Polledo y acogidas a las leyes neoyorkinas.

En 1898 el ingenio comienza una modernización, ampliación y apropiación de tierras para la siembra de caña se comienzan a tender vías férreas y grúas, se va desarrollando hasta alcanzar las 300 000 @/día. En 1914 molía mas de 14 millones de @/año después es modificado con la adición de un filtro de cachaza, un nuevo clarificador que aumenta la capacidad a 350 000 @/día. En 1916 se instalan máquinas de moler Fulton para el tandem. Los hornos se modifican, se instalan cuatro calderas de vapor. En la década del

cuarenta se cambia el tren de engranes, se aumenta la velocidad periférica de las mazas a fin de aumentar la velocidad para alcanzar una molidura de 350 000 @s/día.

En la década del 50 sufrió una serie de reparaciones capitales que lo llevaron a moler 400 000 @s/día: se instaló un descolmador tipo Espinosa, se sustituyó una de las dos desmenzadoras, se introdujo el rayado helicoidal a todas las mazas del tandem, se modificaron los conductores intermedios, a finales de la década anterior se había instalado una caldera Stirling, aumentando la capacidad de generación de vapor, lo que hizo posible la instalación de otro tacho de mayor capacidad, se modificó el sistema de imbibición y se adicionó un filtro de cachaza marca Oliva.

En 1944 se montó una destilería, aprovechando construcciones de un antiguo proyecto de celulosa de bagazo.

Con el triunfo de la revolución el ingenio ha recibido grandes cambios que se han ido desarrollando hasta la fecha con vistas a mejorar su eficiencia, su capacidad de molidura y su eficiencia energética esta última con vistas a disminuir el consumo de energía ya que un aspecto muy importante hoy en día es la realización de un producto consumiendo la menor cantidad posible de este indicador.

El área del basculador se remodeló completa se instalaron descolmadores tipo alzada para ayudar a eliminar cualquier atoro que se produzca cuando se van virar los carros de caña.

En la zona de las calderas se instaló una caldera nueva de mayor capacidad de vapor con vistas a poseer el flujo necesario para los requerimientos del ingenio.

También se instalaron nuevos tachos para facilitar el proceso de cristalización del azúcar. Un hecho de gran importancia para el contenido de este trabajo lo constituyó el proceso de electrificación del tandem. Para la zafra de 1995 se sustituyó la máquina de vapor que movía el primer molino por un motor eléctrico de 500 kW y 6000 v. Para la zafra 2002 se sustituyó el equipo de vapor que movía los molinos 5 y 6 por un motor eléctrico de 800 Kw y 6000 v y para la zafra del 2003 se desarrolló el mismo proceso con los molinos 2 y 3, con un motor de la misma potencia y del mismo voltaje. Este proceso también incluyó la instalación de Tolvas Donnelly en todos los molinos con excepción del tercero. Se eliminó el segundo molino, con lo que el tandem cuenta actualmente con cinco molinos. En el 2000 se instalaron dos turbogeneradores de segunda mano con una

capacidad de generación de 4 MW cada uno.

1.2 Análisis Bibliográfico:

En el estudio bibliográfico desarrollado se analizaron los trabajos que tuvieran una relación más directa con el consumo de potencia en los molinos y con la extracción en los molinos de caña. Se revisaron diferentes textos de autores reconocidos mundialmente, artículos de revistas, trabajos presentados en los encuentros de jefes de maquinarias, publicaciones de la International Sugar Journal, conferencias, memorias y publicaciones de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba (A.T.A.C.). A continuación se reseñan los más importantes:

1.2.1 Sobre la extracción.

Con relación a la extracción existen muchas referencias en textos y en publicaciones periódicas así como se han encontrado trabajos en Internet.

En [43] se señala que la extracción es el primer paso en el proceso del azúcar. El material seco de la caña (la fibra) constituye entre el 11 y 16 % ,mientras que el jugo forma del 84 al 89 % en esta consideración toda el agua entra en el guarapo y tanto en la fibra como en este hay presentes constituyentes orgánicos e inorgánicos.

La extracción es el proceso encargado de obtener la mayor cantidad de sacarosa posible y dejando las menores pérdidas posibles en el bagazo. En la práctica es realmente imposible extraer por compresiones sucesivas todo el jugo retenido en la fibra del bagazo, ya que este llega a una condición en la que se alcanza un valor conocido como fibra límite del bagazo y retiene el 50% de jugo con relación a su masa total.

Los llamados difusores para la extracción del jugo, tienen la ventaja de que evitan el mezclado de los jugos de baja pureza presentes en los haces fibrovasculares y que son extraídos por la presión de los molino, lo que trae en consecuencia una mayor pureza en el jugo mezclado.

Este proceso es realmente un proceso de lavado, de desplazamiento, en el que se requiere que las células de la caña sean rotas en una magnitud del 94% por lo menos para facilitar

la extracción. Estos equipos no se emplean actualmente en Cuba.

Por otra parte en [19] se definen los conceptos de imbibición y maceración de la siguiente manera.

Imbibición: Para mejorar la extracción de sacarosa, se aplica agua de imbibición. Este proceso consiste en agregar agua al bagazo antes de su paso por el molino final. La imbibición aumenta la extracción de sacarosa en aproximadamente un 15 %.

Maceración: Este es un proceso que se aplica paralelo a la imbibición y que tiene la misma finalidad (aumentar la extracción). Consiste en remojar el bagazo con el jugo diluido producto de la imbibición. El jugo extraído por un molino se aplica a la entrada del molino anterior. En un tamden de 5 molinos se aplica maceración al segundo, tercero y cuarto molino, e imbibición al quinto molino.

A su vez en [18] se plantea que los indicadores de azucarería Brix, % de Pol en jugo, % de pol en caña, % de Sacarosa Real, Pureza y Ph disminuyen en las cañas atacadas por el bórer, por lo tanto, la extracción de azúcar en las variedades C140-81 y C120-78 son afectadas negativamente por la presencia de esta plaga. Debido a la presencia de esta plaga disminuye significativamente la concentración de sólidos disueltos totales en el jugo (Brix), en los por cientos de pol en jugo y en caña (sacarosa aparente) y en la sacarosa real disminuyendo el contenido de azúcar por caña a moler en las muestras afectadas por tanto la extracción de azúcar (sacarosa) es afectada negativamente por la presencia del bórer, dichas afectaciones, no sólo se reflejan en la disminución del contenido de azúcar por caña a moler, sino que también afectará directamente la eficiencia del proceso tecnológico. Esto explica también el; trabajo que se viene desarrollando en todos los países azucareros alrededor de las variedades resistentes a las plagas.

En [4]se plantea el trabajo desarrollado en un central en Colombia con vistas a mejorar la eficiencia disminuyendo las perdidas de sacarosa. Se plantea que la eficiencia del proceso de extracción puede definirse como la diferencia entre la cantidad de jugo que trae la caña y la cantidad de jugo obtenido, o tomar como indicador la cantidad de sacarosa remanente en el bagazo.

En el último caso se requiere incorporar el valor de la fibra del bagazo resultante del último molino y para ello es necesario conocer el Brix del jugo del bagazo. Para estimar

el Brix del bagazo se pueden utilizar tres metodologías diferentes :una calculando el brix, otra por desintegración húmeda y por prensado en seco. Luego de realizar estos tres métodos se determinó que existen diferencias significativas entre el primer método y el segundo y que el tercero queda en un valor intermedio.

Para establecer si las variaciones observadas con los tres métodos se debían a errores cometidos con la metodología de los mismos se procedió de la siguiente manera; se estableció el perfil de las purezas de los jugos extraídos en cada molino del tandem. La diferencia se hizo más notoria a medida que se avanzó en el tandem, en congruencia con las diferencias halladas en los métodos dos y uno durante la extracción total .

En el ingenio Pichichi [20] se encontró lo siguiente: la caña al pasar por el primer molino, después de haber sido preparada por las picadoras, pierde de 70 a 80% de su peso en jugo. Para lograr una buena extracción se lava el bagazo con agua o jugo pobre en sacarosa, esto se hace al salir de cada molino para diluir la sacarosa que aún está contenida en el bagazo y así aumentar la extracción para alcanzar más del 85% del azúcar que contenía la caña .

El bagazo que sale de los molinos tiene aproximadamente 50% de humedad, 2 - 3% de sacarosa y 47% de fibra. Y por otra parte al bagazo se le dan diferentes usos como: combustible para las calderas, el llamado bagacillo se emplea para la filtración de la cachaza y Materia prima fundamental en la fabricación de tableros aglomerados de bagazo utilizados en la fabricación de muebles, divisiones, etc.

En el [42] se plantea que al aumentar la densidad del colchón de caña mejora la capacidad de molido y que al abrir las celdas de jugo se facilita la extracción por compresión. Se han analizado dos casos de molido con todos los parámetros exactamente iguales (clase de caña, eficiencia del trabajo de los molinos, imbibición etc.) excepto el índice de preparación en cuchillas, que en el primer caso es muy pobre de 37,5 y en el segundo caso ha mejorado a valores medios de 60. Por haberse mejorado la preparación ,el primer molino (extracción en seco) fue capaz de mejorar su extracción de Brix de 55% 68,24% (en el primer caso, el bagazo con 25% de fibra y en el segundo con 32).

En los molinos con imbibición y maceración en el primer caso, con % fibra en bagazo promedio de 39,625; tiene una extracción de 84,8% y en el segundo caso ,con fibra en bagazo promedio de 40,75; tiene una extracción de 85,6%.

La información técnica que aparece a continuación pertenece al ingenio San Nicolás [21] el tandem de este ingenio esta compuesto por seis molinos cada molino presenta cuarta maza y tolva Donelly. Los molinos 1 y 2: movidos por turbina Elliott Mod. 2DYR, 2 etapas, con potencia de 750 H.P. a 3,600 r.p.m. El molino 3: movido por turbina de vapor Elliott 2DYR, 2 etapas, con potencia nominal de 500 H.P. a 3,500 r.p.m. acoplada a reductor de alta velocidad Lufkin Mod. M390C. Por otra parte los molinos 4 y 5: movidos por turbinas Murray, Mod. TMD, de una etapa, 750 H.P. nominal, esta acoplada a un reductor. Y por último el molino 6: movido por turbina Murray Mod. UV4 3600 r.p.m acoplada a un reductor de alta velocidad Lufkin con una relación de velocidad de 19.01:1 y una potencia nominal de 500 H.P. Este ingenio cuenta con una destilería con una capacidad de instalada de 40,000 lts cuenta con dos equipos de destilación cada uno con una capacidad de producción es de 20,000 lts/por día de alcohol. Y para almacenar el alcohol cuenta con dos tanques de acero inoxidable con capacidad de 210,000 lts c/u.

Para una zafra con duración de 182 días el número de toneladas de caña molida fue de 472,107.43 y con un porcentaje de tiempo perdido de 36.22 %. Los datos que se muestran continuación son resultados de la zafra del 2002 : Kgrs. de miel final a 85° Bx. Por Tons. de caña 35,44 Extracción Sacarosa %. 95.163, Imbibición de caña 23.37, Tons. de azúcar producida 53,165.20, Tipo de azúcar producida y Pol. Refinada, 99.90Lts. de petróleo por tonelada de caña 10,73.

BALANCE DE SACAROSA: Pérdidas: Bagazo 0.651, Pérdidas: Miel Final 1.081,
Pérdidas:

Cachaza 0.200.

BAGAZO: Fibra de 46.05 , un % Humedad 50.95 y un % Sacarosa de 2.31 .

En [24] se plantea la influencia de la imbibición en la alimentación y a su vez la importancia de la misma en el proceso de extracción. Se dice que los molinos toman más difícilmente al bagazo embebido que al seco. Por esta razón los operadores disminuyen la imbibición cuando encuentran difícil la alimentación o se producen atascamientos frecuentes; es necesario no dejarles el control de estas operaciones para asegurarse de

que no emplearán este método, generalmente desastroso desde el punto de vista financiero ya que por poner un ejemplo las pérdidas mas significativas serían en el bagazo debido a que el mismo necesita un flujo de agua de imbibición y a una temperatura dada para que las celdas puedan ser abiertas y que con esto se produzca el llamado lavado de bagazo. En [25] se señala que en la fábrica de azúcar se realiza el machacado y triturado entre rodillos dentados. Durante el triturado, se rocía agua caliente sobre el material para disolver cualquier azúcar restante. El material sólido y pulposo que queda después de la extracción del jugo se llama bagazo, el cual se seca y se usa como combustible.

Al jugo extraído se le añade cal y la mezcla se lleva a ebullición; durante este calentamiento los ácidos orgánicos indeseados forman con la cal compuestos insolubles que se pueden filtrar junto con las demás impurezas sólidas.

La Sacarina fue descubierta en 1879 en la Universidad John Hopkins de Baltimore, por el norteamericano Constantin Fahlberg. Estudios posteriores indicaron que si era utilizada en gran cantidad, puede ser perjudicial para la salud.

En 1965, los investigadores del laboratorio norteamericano Searle, descubrieron el edulcorante sintético llamado aspartamo, con un poder endulzante 200 veces mayor que el azúcar, pero que no produce caries ni aporta calorías. Fue aprobado en EEUU a partir de 1982 y también lo consumen Alemania, Suiza y Gran Bretaña.

1.2.2 Sobre el consumo de potencia en los molinos.

Desde el año 1927, ya en Cuba se viene realizando un análisis del consumo de potencia por el ingeniero J.B. Scharnberg [55] el cual destaca como principales parámetros que afectan el consumo de potencia:

Preparación de la caña.

Capacidad segura.

El factor humano que juega un papel importante al ejecutar la operación del equipo de moler.

Tromp L. A. [58] plantea que por la velocidad periférica de las mazas, el molino desarrolla por sus aberturas cierto volumen, que es el producto de estos dos factores.

Hay otros factores como, la aspereza, diámetro y drenaje de las masas, que deben satisfacer a las demandas ya conocidas de la practica moderna.

Mayo [37] planteó un aumento significativo del consumo específico de potencia ($\text{HP}/100@s$ de caña) cuando se aumentaba la capacidad en un 25 %, en este sentido ha podido comprobarse posteriormente que cuando los aumentos de capacidad son discretos y lógicos se obtiene más bien una disminución del consumo específico. Recomendó que sería conveniente aumentar la velocidad sobre la base de aumentar el diámetro de las mazas ya que con esto aumenta el período de compresión del bagazo. Este mismo autor [38] llegó a proponer una expresión para calcular el comportamiento de distintos tandem, pero en lo que se refiere a la extracción. En otro trabajo posterior [39] critica la afirmación de Tromp de que el consumo de potencia del molino es solamente de naturaleza friccional y, mediante una demostración matemática llega a la conclusión de que en la extracción de jugo se gasta alrededor de un 36 % del consumo total de potencia en el molino, pero no relacionó experiencias prácticas sobre la comprobación de la veracidad de esta afirmación ni la forma en que llegó a esta conclusión.

Weil [62] enumeró los perfeccionamientos que había realizado en el proceso de molienda, donde logró aumentos sustanciales de la capacidad sin perjuicio de la extracción mediante un aumento de las velocidades, un aumento de las ranuras de drenaje, aumento de las presiones, mejoras en la alimentación mediante la utilización de rodillos compresores y mejoras en la imbibición, aunque no hace referencia al consumo de potencia, que debe haber aumentado sustancialmente.

Por su parte Días [9] investigó la influencia de la altura de la cuchilla en el consumo de potencia aunque midió ésta en una máquina que movía al mismo tiempo varias unidades y no lo desarrolló sobre una base científica sino sobre todo a partir de observaciones y

mediciones prácticas que además son bastante difíciles de realizar en una máquina de vapor.

Chinchilla Varona [5] desarrolló un trabajo muy interesante en el cual destacó que aunque el consumo de potencia aumentaba con la velocidad, no lo hacía de una forma lineal, también estableció curvas para medir el consumo de potencia en función de la velocidad y desarrolló las mediciones en tres condiciones: en vacío, con el colchón de bagazo atravesando el molino, pero sin presión aplicada y en una molida normal. Para una molida de 1890 @s de fibra/ hora, con 95 % de extracción, 180 % de agua de imbibición con relación a la fibra, en un sexto molino, con 440 ton cortas de fuerza hidráulica total y para una velocidad de 50 pies/ min reportó valores de 1,03 kW-h/@ de fibra (equivalentes a 89,6 kW-h/Tm de fibra). Este valor es muy elevado aún para un tandem completo por lo que puede existir algún error en ese sentido. Otro aspecto importante que desarrolló en el trabajo es la enumeración de los elementos friccionales que intervienen en el consumo de potencia entre los cuales enumeró dos fuerzas: una “fuerza debida a la fricción mecánica”, que subdividió a su vez en fricción en las chumaceras, de los raspadores y la cuchilla central con las mazas, de las tapas superiores de la chumacera de la maza superior al deslizar contra la quijada de la virgen (es el único autor que ha enumerado este aspecto), fricción en los acoplamientos y en la transmisión y en las coronas. A la otra fuerza la denominó la fricción del bagazo y la subdividió en: fricción del bagazo al pasar por la cuchilla central y los raspadores y fricción y desgarramiento del bagazo debido a la diferencia de diámetros de las mazas (tampoco este elemento es citado por ningún otro autor). En realidad este trabajo tiene un gran interés desde de el punto de vista conceptual teórico pero en las condiciones de la época era muy difícil establecer determinaciones de valores prácticos por el poco desarrollo alcanzado en los instrumentos de medición.

Este mismo autor [6] supuso la eficiencia mecánica del molino en un 35 %, utilizando valores estimados, de acuerdo con ecuaciones deducidas para un molino dado, de igual forma estimó las pérdidas debidas a diferentes factores. De nuevo este autor trabaja en condiciones muy particulares y con ecuaciones empíricas.

Varona [60] destaca los componentes de la fuerza debido a la fricción mecánica dentro de los cuales se tienen:

Fricción de chumaceras del molino.

Fricción de los raspadores y la cuchilla, las cuales actúan como retranca en los molinos.

Fricción de las chumaceras de las maza mayor al resbalar por las correderas de la virgen.

Fricción del coupling.

Fricción de los engranajes y coronas.

Fricción de los ejes, cadenas, etc. del conductor intermedio.

Hugot ha tratado el tema del consumo de potencia en las dos versiones más importantes de su manual [24 y 25]. En ambos textos tuvo en cuenta seis factores que afectan el consumo de potencia en los molinos y los enumeró como:

Potencia consumida en la compresión del bagazo.

Potencia consumida por fricción en los collarines.

Potencia consumida por fricción entre el bagazo y la cuchilla central

Potencia consumida por la cuchilla central y los raspadores al friccionar con las mazas.

Potencia consumida para el movimiento de los conductores intermedios.

Potencia consumida por pérdidas en la transmisión desde el equipo motriz hasta las coronas.

En el manual de planta moledora [40] se planteó la inclusión de las pérdidas en los acoplamientos.

Pérez [49] dedujo una expresión para el consumo de potencia que incluye la potencia

consumida por la cuarta maza y elimina la potencia consumida por los conductores intermedios. Estas son las condiciones actuales con que operan los molinos en la mayoría de los centrales del mundo, más tarde [50] desarrolló un método de diagnóstico de los molinos, el cual se aplica en este trabajo.

Con relación al tema de las transmisiones revisten importancia los siguientes trabajos:

S. Herscovici [15] describió una caja de engranes de tipo planetario de alta potencia para reducir los costos de funcionamiento y mejorar la eficiencia de los molinos. Esta caja redujo las pérdidas mecánicas ya que es más adecuada para la transferencia de alto torque porque tiene seis pares de dientes que soportan simultáneamente la carga. Debido a que el torque de salida del planetario se origina de la suma de las fuerzas de los seis engranajes, las fuerzas se reducen y por consiguiente la caja entera puede ser mucho más pequeña que un reductor paralelo, quizás menos de la mitad del tamaño de éste; así que puede diseñarse para proporcionar una vida más larga.

En los trabajos de Moya [44], Cabello [3] y Negrín [46] se establece un completo análisis de la problemática de las coronas que se emplean en Cuba en los molinos de caña y se plantean recomendaciones desde el punto de vista de materiales constructivos, tecnología de fabricación, estandarización de perfiles, montaje, operación y mantenimiento que, de llevarse a cabo, pueden introducir mejoras sustanciales de estos componentes en todos los sentidos, incluyendo la eficiencia mecánica de su funcionamiento y por tanto la reducción de las pérdidas mecánicas en el molino, que actúan sobre las mazas y, en ese sentido, la potencia que se consume.

Abón [1] realizó las mediciones en el consumo de potencia sobre las tres mazas individualmente, en que se utilizaron motores hidráulicos para el movimiento en las condiciones específicas de Cuba. Este autor señala los valores de consumo en cada uno de los cilindros del molino. En este aspecto existen conclusiones contradictorias entre los resultados de distintos autores ya que unos han determinado valores de consumo mayores en la maza cañera que en la bagacera y en otros ha ocurrido lo contrario, se comporta de manera diferente y su ajuste requiere un tratamiento por separado.

Sobre el tema del cálculo de las aberturas en los molinos se han producido muchas publicaciones. En el Manual de Planta Moledora [42] se brindó una orientación precisa a los técnicos encargados de desarrollar estos cálculos sobre el proceso que debe desarrollarse previo al desarrollo de los mismos, las consideraciones a tener en cuenta en el proceso de cálculo y los ajustes posteriores que deben efectuarse en función del comportamiento de cada una de las unidades de molida y del tandem en su conjunto.

Gibbon [13], desarrolló un sistema CAD para el trazado de la cuchilla central. Aspecto que más tarde fue profundizado por Fernández [12],[11], que lo extendió a todos los componentes del molino, incluyendo las mazas y sus apoyos, así como la influencia geométrica de las coronas. Estos trabajos pueden contribuir al ahorro en el consumo de potencia que pudiera generarse por un perfil inadecuado de la parte superior de la cuchilla central y en el caso del trabajo de Fernández a posiciones o dimensiones inadecuadas de los demás componentes del molino.

Cantidad de tierra en el bagazo y un mayor costo a la hora de lograr aumentos en la capacidad de la fábrica.

Kent [30] presentó un método que permite cuantificar el comportamiento de un tandem de molinos, este autor midió las variables tecnológicas más importantes en la caña preparada y en el bagazo, mediante un proceso analítico y por comparación con la toma de muestras, lo cual le permitió determinar la precisión del método teórico.

Este mismo autor [31] expuso más tarde el desarrollo de un modelo para estudiar el flujo de fibra a través de un tren de molinos, lo que incluyó la corriente de jugo de recirculación como parte del sistema de imbibición. Al incluir también la fibra recirculada. El modelo es capaz de estimar la razón de fibra que está siendo procesada por cada unidad de molida, así se identificó el molino que procesa una mayor cantidad de fibra – en este caso el segundo-. En el trabajo se expresan las bondades que este modelo presenta en la investigación del comportamiento general de las unidades de molida. Esto es particularmente importante si se tiene en cuenta el efecto del procesamiento de la fibra en el consumo de energía en cada una de las unidades del tandem.

Murry y Holt [45] plantearon la dificultad que existe en el trazado de modelos matemáticos para evaluar el comportamiento del tandem a través de los valores de las propiedades de colchón de caña preparada y del bagazo saliendo del proceso, donde las generalizaciones son arriesgadas por la variabilidad de las condiciones en que se tomen las muestras y de la precisión en los equipos de medición. Concluyó que existe una relación muy estrecha entre la fineza del material y el grado de preparación de la caña que depende también de la fibra contenida en la caña aunque no se plantea una cuantificación precisa de estas relaciones.

Ramanriskina et al [52] enumeraron el desarrollo reciente en los molinos de caña en relación con su potencial para el ahorro de energía y mejoras en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto. Plantearon que el molino autoajustable o molino de relación constante ha sufrido una serie de modificaciones desde su introducción en 1963. Señalaron sus características y ventajas (notable facilidad de mantenimiento); ya que ahora es asequible en diseños de 4 mazas que ofrecen más capacidad de producción y más eficiente extracción de jugo. Tampoco se refiere al ahorro de energía por la introducción de este de este tipo de molinos.

Lebrón [35] analizó la conversión de un molino de tres a cuatro mazas, señalando que este principio se originó en Sudáfrica en fecha tan temprana como 1960 para complementar la tolva vertical cerrada (Donnelly) de alimentación. En la industria azucarera de USA fue usada por primera vez por los productores de azúcar de Valle del Río Grande en 1978. En este trabajo se presentó un procedimiento para la incorporación de la cuarta maza y los equipos inherentes como grúa para los ingenieros, con énfasis en las modificaciones de la virgen, lo cual puede afectar sensiblemente el consumo general de potencia pero no se menciona en este trabajo.

Un aspecto muy importante que se relaciona con el objeto de estudio de este trabajo es la instalación de tolvas Donnelly ya que en varios textos [42 y 24] se plantean aumentos de la capacidad de molida sin aumentar sensiblemente el consumo de potencia en esta operación.

1.3 Memoria descriptiva:

El objeto de estudio de este trabajo de diploma es el CAI “Melanio Hernández”. Dentro del mismo se analizarán las áreas de recepción, preparación y transportación de la caña hasta los molinos y el tandem propiamente dicho así como el sistema de preparación y molida. Este ingenio comenzó la zafra 2002-2003 con los siguientes elementos.

- En el transcurso de esta zafra se molió una buena cantidad de variedades de caña en los numerosos campos del ingenio pero entre las principales se tiene la Cuba 323-68 con 36 266 tn, la Cuba 1051-73 con 34 936 tn, la Mayagüez con 3222 tn entre otras.
- El área de recepción tiene las siguientes características: un virador lateral de carros de ferrocarril y dos viradores de camiones respectivamente los cuales tienen un motor que trabaja para los tres con una potencia instalada de 75 kW y que mueve una bomba que alimenta los pistones de los tres viradores.
- En el área de transportación cuenta con tres transportadores (esteras) el primero tiene una longitud de 38,35 metros de largo y cuenta con un motor cuya potencia es de 55 kW y con una velocidad angular de 1175 rev/min. El esquema de transmisión de esta estera está compuesto por los siguientes elementos, un reductor con relación de transmisión de 40 y de tres pasos, una transmisión por cadena de $Z_1=18$ y un $Z_2=27$ y una transmisión por engranajes con $Z_1=12$ para el piñón y $Z_2=142$ para la catalina.
- Seguidamente aparece un segundo transportador de unos 31,7 metros de longitud con una velocidad de 3500 rev/min y 98 kW de potencia la misma cuenta con un motor hidráulico cuya velocidad nominal de operación es de 12 rev/min. El esquema de transmisión de esta estera está compuesto por los siguientes elementos una transmisión por engranajes de $Z_1=25$ para el piñón y $Z_2=142$ para la catalina. Sobre esta estera funcionan dos juegos de cuchillas Zoazaga y Perret con motores independientes de 400 kW movidos a 500 rev/min. El primer juego posee un total de 100 machetes con un ancho de corte de 16 mm con un radio de 650

mm del eje a la punta de la cuchilla. El segundo posee 104 machetes con un ancho de corte de 16 mm y con un radio de 850 mm del eje a la punta de la cuchilla. En esta estera se encuentran un nivelador cuyo motor se mueve a 900 rev/min y posee una potencia instalada de 9 kW.

- Por último aparece el transportador que corresponde a la estera número 3 la cual tiene una longitud de 10 m y la potencia instalada es de 11 kW con una velocidad angular de 1750 rev/min y la misma alimenta el primer molino. El esquema de transmisión del mismo está compuesto por los siguientes elementos un reductor con una relación de transmisión de 30,1 y de tres pasos y una transmisión por cadena con $Z_1 = 14$ y $Z_2 = 46$. Los esquemas de todos los transportadores y de sus transmisiones aparecen en los anexos (1,2,3,4,5,6 y 7).
- El área del tandem, que será el centro de la atención del trabajo está equipada con 5 cinco molinos todos con alimentador forzados de cuarta maza del tipo Fulton inclinados, con una longitud de mazas de 7 pie (2,133 m) de longitud. Para esta zafra se trabajó con diámetros de 1 m aproximadamente. Los rayados que se emplean aparecen en la hoja de cálculo en Excel. Para mover los molinos se emplean motores de 500 kW y 600/900rev/min para el primer molino y un motor de 800 kW y 600rev/min para los molinos restantes. La transmisión consta de un reductor con una relación de transmisión de 30 para el primer molino y para los demás molinos es de 12,6, y por último una transmisión abierta de 33 dientes para el piñón y 92 para la catalina en el paso de alta y para el paso de baja 38 para el piñón y 88 para la catalina. Para los molinos dos y tres el número de dientes del piñón es de 34 y para la catalina de 120. En el caso de los molinos cuatro y cinco es de 37 el piñón y 117 la catalina. Todas las unidades poseen cuarta maza alimentadora y a todas las mazas del tandem se le practica la aspereza por soldadura, con electrodo tipo 7 UTP-711. Existe tolva Donnelly para la alimentación de todos los molinos, excepto el tercero. Los conductores intermedios son: el que esta a la entrada del segundo molino es de rastrillo y tiene una potencia instalada de 26 kW y el motor gira a 1760 rev/min, el que esta a la entrada del tercer molino es de tablilla y tiene una potencia instalada de 13 kW y la velocidad angular del motor es de 1760rev/min, a la entrada del cuarto es de

rastrillo y tiene una potencia de 16kW y 1150 rev/min como velocidad angular del motor y a la entrada del quinto molino es de rastrillo y tiene una potencia de 16 kW y la velocidad angular del motor es de 1150rev/min. Para la maceración se emplean tres bombas con potencias instaladas de 15 kW en cada una y para el jugo mezclado se emplea una bomba con una potencia instalada de 37, kW que posee un repuesto exactamente igual. Con la finalidad de colar el guarapo y recircular el bagacillo al tandem se ha instalado un colador rotatorio con una potencia de 10kW. Los esquemas del tandem así como de sus transmisiones aparecen en los anexos (8,9,10 y 11).

- La transportación del bagazo desde los molino hasta las calderas se lleva a cabo de la manera clásica. A la salida del quinto molino se encuentra ubicado un transportador de rastrillos el cual alimenta a las calderas con bagazo. El combustible sobrante se traslada hasta la casa de bagazo. Los componentes de la casa de bagazo son similares a los utilizados en otros centrales, o sea, si se desea encender los hornos cuando está detenido el tandem, entonces se produce una recirculación de combustible desde la casa de bagazo hacia las calderas hasta que comienza la alimentación de bagazo. Todo este sistema ha permitido que, a pesar de las inestabilidades que se han producido en la molido, el ingenio haya podido suministrar vapor a la destilería sin consumir ni una gota de petróleo durante la zafra.

Conclusiones parciales:

- Por sus características históricas y por su equipamiento este ingenio fue seleccionado para este trabajo.
- Existe una gran cantidad de bibliografía sobre el tema de la extracción y sobre el consumo de potencia en la molido de caña, en este trabajo se han reseñado las más importantes desde ambos puntos de vista. Con relación a la extracción se resalta la importancia de una buena dosificación de la maceración y la imbibición

en el proceso de disminución de la pol en bagazo y se alerta sobre los peligros que se corren cuando no existe un buen control de estas variables.

- En la memoria descriptiva del ingenio se destaca el hecho de que el tandem posee cuarta maza alimentadora y que todos los molinos, excepto el tercero, poseen tolva Donnelly para alimentarlos, por lo que se pueden lograr molidas elevadas sin un consumo de potencia muy alto, como se demostrará en el trabajo.

Capítulo II

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA TECNOLÓGICA EN EL TANDEM.

En este capítulo se desarrollará un análisis de la extracción en el tandem. En el caso de la caña azucarera se hizo un trabajo mucho más profundo. En el caso de la caña energética se brindarán solamente algunos indicadores obtenidos por un equipo de trabajo en el CAI ya que por la poca existencia de ese tipo de materia prima y por las condiciones climatológicas existentes se pudo moler esta caña tan solo el último día de zafra. Pero por la utilidad de los datos se recogieron los mismos en el trabajo. Por otra parte el análisis de la extracción se convirtió en una necesidad imperiosa para el CAI “Melanio Hernández” ya que al final de la zafra 2001-2002 se eliminó el segundo molino de los seis que poseía el tandem. Los resultados de los análisis de pol en bagazo en esta zafra arrojaban valores de 2,5 contra 1,75 como promedio en la zafra anterior y se hacía necesario dar una explicación del fenómeno y recomendar medidas para resolverlo.

A continuación se brindan los rudimentos teóricos necesarios sobre este parámetro:

La molienda de la caña es un complejo proceso de extracción en el que intervienen un grupo de variables fundamentales que se relacionan entre sí. Al comparar la eficiencia de un molino con otros equipos del central: bombas, reductores de velocidad, turbogeneradores, incluso una caldera, llegamos a la conclusión de que un molino es un equipo muy ineficiente porque la energía que necesita para realizar trabajo útil (extracción del jugo) es muy alta comparada con el resultado neto.

Unido a esta dificultad técnica está el poco tiempo disponible para realizar el proceso de lixiviación, aspecto fundamental para obtener una buena extracción y disminuir el elevado consumo de energía.

Otro aspecto que complica este proceso es la calidad de la materia prima (en cuanto a su composición) y las constantes variaciones de la misma.

Es fácil comprender que el técnico que se dedica a esta especialidad tiene un complejo problema que resolver.

La condición mínima que requiere cualquier proceso industrial es información técnica y medición de los resultados. No es posible alcanzar altos valores de

eficiencia sin estas herramientas de trabajo, y si se logran alguna vez, es por intuición o casualidad.

Esta es la razón fundamental que obliga a un profundo conocimiento de todas las condiciones necesarias para poder evaluar los resultados de un tandem.

No se puede olvidar que la pérdida de pol en bagazo % pol en caña de un tandem representa entre el 30 y el 40 % de la pérdida total de pol que tiene el ingenio.

En la mayoría de los ingenios del mundo en que se produce la extracción por molinos se lleva a cabo el denominado proceso de imbibición simple que consiste en añadir el agua de imbibición a la entrada del último y recircular los jugos extraídos en las últimas unidades hacia las primeras en un proceso en contracorriente en relación con el colchón de bagazo. Como el tandem de “Melanio Hernández” posee cinco molinos el esquema de flujo de la imbibición y la maceración es el que se muestra en el anexo (12).

2.1.- Información necesaria.

La información técnica necesaria para evaluar el trabajo de un tandem es la siguiente :

- Índice de preparación de la caña.
- % de caña preparada.
- Extracción de jugo por molino.
- Granulometría del bagazo.
- Corrida de Brix por maza y por molino.
- Información del reporte de laboratorio

a) Pol % bagazo

b) Humedad % bagazo

c) Pérdida de Pol % Pol en caña

d) Pérdida de molienda

e) Extracción de Pol

f) Brix y pureza último jugo extraído

2.1.1 Reporte de ajuste del tandem durante la zafra.

Índice de preparación y % de caña preparada.

Puede expresarse de varias formas, una de las más populares en Cuba es el índice de

células rotas. Se considera que la frecuencia mínima de estos análisis es dos veces por semana y sus resultados deben relacionarse con la variedad de caña procesada, su longitud y % pol en bagazo.

Extracción de jugo por molino.

El jugo extraído por el molino se expresa en dos formas:

- Toneladas de jugo extraído/100 toneladas de caña.
- Jugo extraído en porciento del total que entra (bagazo más jugo).

Los datos necesarios para hacer un balance de materiales del tandem y determinar la extracción de jugo por molino son los siguientes:

- Fibra % caña.
- Fibra % bagazo a la salida de cada molino.
- Agua de imbibición % caña.

Cuando el metro de agua de imbibición no es confiable es preferible calcular el % de agua total por diferencia de Brix, en este caso hace falta:

- Brix primera extracción.
- Brix jugo mezclado.

2.1.2 Balance de materiales.

El balance de materiales se hace para 100 tons de caña (que se expresa como 100 tC), por lo tanto, los valores que se obtienen son :

.tons de jugo/100 tC

.% de extracción de jugo por molino.

a) Agua de imbibición.

Para calcular el % de agua de imbibición aplicada, asumiendo que es igual al % de agua total añadida, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Agua de imbibición} = \frac{100 (\text{Bx Jugo primario} - \text{Bx Jugo mezclado})}{\text{Bx Jugo Primario}} \quad (2.1)$$

(tons/100tc)

Para calcular la extracción de cada molino se utilizarán las siguientes relaciones,

todas expresadas por cada 100 tons de caña molida (= 100 tC).

b) Cantidad de bagazo por molino.

La cantidad de bagazo que sale del molino que se analiza, está dada por :

$$\text{saliendo del molino "n", } t_B = \frac{100.Fibra \% Caña}{Fibra \% Bagazo \text{ saliendo del molino}}, (\text{ton}/100\text{tC}) \quad (2.2)$$

c) La cantidad de jugo que extrae el molino será :

$$JE = t_{BSA} + t_{LA} - t_{BSM}$$

donde:

JE - Jugo extraído en toneladas / 100 toneladas de caña.

t_{BSA} - bagazo saliendo del molino anterior en toneladas/100 toneladas de caña.

t_{LA} - cantidad de agua o jugo de maceración añadido al colchón de bagazo que entra al molino en toneladas/100 toneladas de caña.

t_{BSM} - bagazo saliendo del molino que se analiza en toneladas/100 toneladas de caña.

d) El jugo extraído por el molino analizado, en % del bagazo que le entra, está dado por :

$$\% JE = \frac{100.JE \text{ (en toneladas)}}{t_{BSA} + t_{LA}} \quad (2.3)$$

Los valores que recomiendan para la extracción de los distintos molinos de acuerdo con [42] son los siguientes:

Primer molino = 60 – 65%

Resto de los molinos = 50 – 55%

La frecuencia de estas determinaciones debe ser, como mínimo, antes y después de la parada programada para mantenimiento.

Para ilustrar la metodología a utilizar, a continuación se presenta una tabla de cálculo, con valores reales.

Tabla 1 Valores reales de brix.

Datos.	Denominación.	Valor.
Brix del jugo primario	B_{jp}	20,52
Brix del jugo mezclado.l	B_{jm}	15,40
Fibra % caña.	Fc	12,34

Tabla 2 Datos de fibra a la salida de los molinos.

Número del molino.	1	2	3	4	5
Fibra % Bagazo	39,75	41,32	43,78	45,85	50,46

Cálculos

a) Agua imbibición aplicada en tons/100 tC.

$$A_i = \frac{100 (B_{jp} - B_{jm})}{B_{jp}} = \frac{100 (20,52 - 15,40)}{20,52} = 24,95\%$$

Extracción de jugo en cada molino/100 ton caña.

a.1) Quinto molino

$$t_{B5} = \frac{100.F_C}{F_{B5}} = \frac{100.12,34}{50,46} = 24,45 \text{ ton de bagazo saliendo del 5}^{\text{to}} \text{ molino.}$$

$$t_{B4} = \frac{100.F_C}{F_{B4}} = \frac{100.12,34}{45,85} = 26,91 \text{ ton de bagazo saliendo del 4}^{\text{to}} \text{ molino.}$$

$$t_{JE5} = t_{B4} + A_i - t_{B5} = 26,91 + 24,95 - 24,45 = 27,71 \text{ ton. de jugo/100 tC}$$

$$\% J_{E5} = \frac{100.t_{JE5}}{t_{B4} + A_i} = \frac{100.27,71}{26,91 + 24,95} = 53,43 \%$$

a.2) Cuarto molino

$t_{B4} = 26,91$ ton de bagazo saliendo del 4º molino

$$t_{B3} = \frac{100.F_C}{F_{b3}} = \frac{100.12,34}{43,78} = 28,19 \text{ ton. de bagazo saliendo del 3}^{\text{er}} \text{ molino.}$$

$$t_{JE4} = t_{B3} + J_{E5} - t_{B4} = 28,19 + 27,71 - 26,91 = 28,99 \text{ ton. de jugo/100 tC}$$

$$\% JE4 = (100.t_{JE4}) / (t_{B3} + t_{JE5}) = (100.28,99) / (28,19 + 27,71)$$

$$\% J_{E4} = 51,86 \%$$

a.3) Tercer molino.

$t_{B3} = 28,19$ ton Bagazo saliendo del tercer molino.

$$t_{B2} = \frac{100.F_C}{F_{b2}} = \frac{100.12,34}{41,32} = 29,86 \text{ ton. de bagazo saliendo del 2}^{\text{do}} \text{ molino.}$$

$$T_{JE3} = t_{B2} + J_{E4} - t_{B3} = 29,86 + 28,89 - 28,19 = 30,56 \text{ ton. jugo/100 tC}$$

$$\% JE3 = \frac{100.t_{JE3}}{t_{B2} + t_{JE4}} = \frac{100.30,56}{29,86 + 28,99} = 51,92 \%$$

a.4) Segundo molino.

$t_{B2} = 29,86$ ton. bagazo saliendo del 2^{do} molino.

$$t_{B1} = \frac{100.F_C}{F_{b1}} = \frac{100.12,34}{39,75} = 31,04 \text{ ton. de bagazo saliendo del 1^{er} molino.}$$

$$t_{JE2} = t_{B1} + t_{JE3} - t_{B2} = 31,04 + 30,56 - 29,86 = 31,74 \text{ ton. jugo/100 tC.}$$

$$\% J_{E2} = \frac{100.t_{JE2}}{t_{B1} + t_{JE3}} = \frac{100.31,74}{31,04 + 30,56} = 51,53 \%$$

a.5) Primer molino

$t_{B1} = 31,04$ ton. Bagazo saliendo del 1^{er} molino

$$t_{JE1} = t_{CAÑA} - t_{B1} = 100,00 - 31,04 = 68,96 \text{ ton Jugo/100 tC}$$

$$\% J_{E1} = \frac{100.t_{JE1}}{t_{CAÑA}} = \frac{100.68,96}{100,00} = 68,96 \%$$

Tabla 3 Resumen del ejemplo.

Molino número	1	2	3	4	5
Jugo extraído en % del bagazo que entra al molino	68,96	51,53	51,92	51,86	53,43

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos referentes a los valores de jugo extraído en % del bagazo que entra al molino los cuales dieron para el primer molino 68,96% y para el resto de los molinos en el orden del 50%. Comparándolos con lo planteado por el Manual de Planta Moledora se determinó que los reales sobre cumplen los recomendados.

El complemento ideal de la extracción por molino es la determinación del índice de preparación a la salida de cada molino. Este análisis se realiza con la misma muestra de bagazo que se utiliza para la determinación de la fibra % bagazo.

2.1.3 Extracción relativa .

El complemento de los análisis de que se ha hablado en este trabajo y en particular de la corrida de Brix que se detalla en otras metodologías es la determinación de la

extracción relativa de la maza cañera, para lo cual solo se requiere tomar, adicionalmente, la muestra de jugo mezclado (cañera-bagacera) del molino y determinar su Brix.

Con los tres valores de brix se calcula la extracción relativa aplicando la expresión siguiente:

$$X_c = \frac{B_b - B_m}{B_b - B_c} \quad (2.4)$$

donde:

X_c – proporción de jugo extraído por la maza cañera.

B_b – Brix del jugo de la bagacera..

B_c – Brix del jugo de la cañera.

B_m – Brix del jugo mezclado del molino, tomado de la canal.

A partir de aquí se puede calcular la proporción de jugo extraído de la maza bagacera por la expresión:

$$X_b = 1.00 - X_c \quad (2.5)$$

A continuación se brinda un calculan los valores obtenidos para el quinto molino:

$$B_c = 2,92$$

$$B_b = 4,75$$

$$B_m = 3.44$$

$$X_c = \frac{4,75 - 3,44}{4,75 - 2,92} = 0,72$$

Lo que equivale a decir que la extracción relativa en esta compresión es de un 72 %.

$$X_b = 1 - 0,72 = 0,28 \text{ o sea, un } 28 \%$$

Se considera que el molino trabaja satisfactoriamente cuando las proporciones de jugo extraído por las cañeras son:

Ultimo molino	X _c = 70 a 85 %
Molinos intermedios	X _c = 65 a 75 %
Primer molino	X _c = 60 a 70 %

Entonces puede plantearse que este molino está trabajando correctamente.

Este método fue tomado íntegramente del Manual de Planta Moledora [42] . El Profesor Azaret confeccionó un programa de cálculo que desarrolla las mismas operaciones.

2.2 Métodos utilizados para las mediciones en la investigación y resultados obtenidos.

Tanto para la confección de la base de datos para la caña normal como para la caña energética las corridas se organizaron de la siguiente forma: se fijaron los parámetros que se consideraron como independientes como: altura del colchón de cañas a la entrada de la 1ra. Cuchilla picadora; velocidades angulares de los motores en los distintos equipos como cuchillas picadoras, molinos, conductores intermedios, colador circular, bombas de jugos, etc.; presiones hidráulicas aplicadas en el tandem; lectura del metro de agua de imbibición; relación de transmisión de los trenes de engranes del tandem; settings de los molinos del tandem; altura de caña en la tolva alimentadora del 1er. Molino; presión hidráulica en cada molino y flujo y temperatura del agua de imbibición.

Para las lecturas de la molida horaria se procedió de la siguiente forma:

1-Se marcó una referencia en la estera de caña No. 1 inmediatamente después del virador de carros en un momento determinado cuando el bulto, correspondiente a un carro o camión, llega a la marca se toma la hora exacta y se van anotando los números de identificación de los carros o camiones que van llegando a la marca. Cuando se tenga una cantidad adecuada de carros o camiones se espera que termine de pasar la marca, el vehículo seleccionado y se toma la hora exacta inmediatamente. Se continúa tomando los números de identificación haciendo “cortes” adecuados cada cierto tiempo que puede ser 20 ó 30 minutos con el fin que si hay alguna parada que no es anotada, solo se afecta la última lectura.

2-Al finalizar el período de la prueba, se toman los datos de los pesos en las romanas correspondientes y se calculan las molidas horarias de todos los “cortes” que se hicieron

durante el período. Como se tienen anotadas las horas, podemos encontrar la molida horaria correspondiente a la o las corridas que se hicieron en el tandem.

Para realizar las corridas en el tandem, se organizó un período de 20 minutos antes, donde se ajustaron a los valores prefijados todos los parámetros independientes como la altura del colchón de cañas a la entrada de las cuchillas, altura de la caña preparada en la tolva de alimentación del primer molino, presiones hidráulicas aplicadas, etc. además de las condiciones normales de operación de las áreas de generación de vapor y casa de calderas.

De esta manera se aseguraba que si se molía establemente durante 20 min, con las condiciones de operación prefijadas y a continuación se vertía la cal para marcar el colchón de cañas y se procedía a tomar las muestras de bagazo y jugos en el tandem los resultados serían representativos de la molida horaria correspondiente y sería representativo de la estabilidad del proceso logrado ya que la toma de muestras solo toma alrededor de 5 min.

Para la toma de muestras se preparó un recipiente que cupiera en la boca de la tolva del 1er. Molino y que cubriera toda el área de la tolva de tal manera que la muestra fuera representativa de todo el ancho y alto del colchón en la estera elevadora. Para las muestras de bagazo a la salida de cada molino se habilitaron recipientes de zinc con su tapa correspondiente, donde se recolectaron las muestras y se taparon. Para las muestras de jugo, se habilitaron recipientes de zinc de menor tamaño, tomándose las muestras al unísono con las muestras de bagazo. En cada caso se tomaban las muestras de jugo primario y mezclado.

Aunque se prefijaba un valor en el metro de agua de imbibición, el programa utilizado calcula dicho valor por los datos de los valores de jugo primario y jugo mezclado.

2.2.1-Método utilizado para el cálculo del índice de preparación y la densidad volumétrica.

El objetivo de esta determinación es la simplificación del proceso llevado a cabo para determinar el índice de preparación en distintas muestras del colchón de caña.

El índice de preparación es un parámetro importante en la caracterización de cualquier sistema de preparación del colchón de caña.

2.2.2-Método de laboratorio para la determinación de la preparación de la caña.

Uno de los métodos que se emplea en el mundo es el que plantea el MACU [36] y que consiste en lo siguiente:

- 1.- Tomar una muestra que abarque todo lo alto y ancho del colchón.
- 2.- Clasificar esta muestra sobre una manta en
 - Cañas enteras.
 - Cañas parcialmente preparadas. Cañas no preparadas.
- 3.- Pesarse los tres componentes aparte y determinar los % de cada uno que existen en la muestra.
- 4.- *Se toman 500 g de estos tres componentes en su conjunto de tal forma que se encuentren representados cada uno de ellos en la misma proporción en que estaban en la muestra.*
- 5.- Se introducen estos 500 g en un recipiente y se le añaden 2000 ml de agua destilada. Se tapa esta mezcla y se remueve manualmente el recipiente cada 10 minutos.
- 6.- Se destapa el recipiente al cabo de los 20 minutos, se revuelve y a una muestra del líquido que está presente en él se le determina el Brix (se le denominará B_{X1})
- 7.- Se toman otros 500g de la muestra total y se pasan por la desfibradora de laboratorio. En este equipo se puede obtener una muestra patrón con un 100 % de celdas rotas.
- 8.- Se introduce esta muestra en un recipiente cerrado, se le añaden 2000 ml de agua destilada, se tapa el recipiente y se remueve manualmente cada 10 minutos.
- 9.- Se destapa el recipiente al cabo de 40 minutos, se revuelve. A una muestra del líquido que está presente en él se le determina el brix. (se le denominará B_{X2}).
- 10.- El índice de preparación será:

$$IP = \frac{B_{X1}}{B_{X2}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

La confiabilidad de este método depende de la representatividad de la muestra y del celo con que se realicen las operaciones de laboratorio.

2.2.3-Determinación del índice de preparación a partir de la densidad de la caña.

Algunos textos como el Jenkin [28] plantean que existe una relación directa entre el índice de preparación de un colchón de caña y su densidad y, si se desarrolla convenientemente una sencilla técnica experimental, esta densidad puede ser determinada.

El método propuesto consiste en lo siguiente:

- 1.- Tomar una muestra representativa del colchón (en las mismas condiciones que para la determinación del índice por el método de células rotas).
- 2.- Se introduce la muestra en un recipiente de medidas preconcebidas y se somete a una presión preconcebida durante un tiempo también preconcebido.
- 3.- Se le determinan el volumen y la masa y al dividir la segunda entre el primero se tendrá la densidad de este colchón a esta presión.

Si a un número determinado de muestras se le realizan las dos determinaciones puede determinarse para unas condiciones dadas la correlación entre el índice de preparación y la densidad. Debido a las pocas corridas que se realizaron no se logró encontrar una relación entre índice de preparación y la densidad volumétrica.

Es necesario esperar un tiempo determinado después que se ha aplicado la carga sobre la muestra, puesto que en el colchón se ha introducido aire durante la preparación y será necesario que el mismo lo expulse.

Para nuestro caso se tomaron las siguientes condiciones de trabajo:

Tiempo de espera para realizar las mediciones = 10 minutos.

Peso del pistón = 122,625 N.

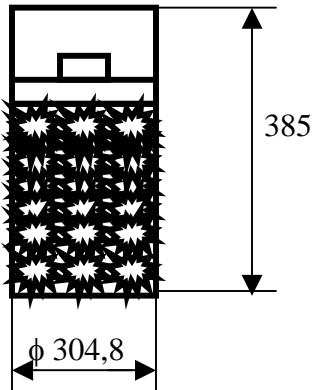
Diámetro del pistón = 304,8 mm = 0,3048 m

Área del pistón = 0,072966 m²

Presión a aplicar = peso del pistón / área del pistón = 122,625 / 0,072966

p = 1681 Pa.

Esquema de la instalación.



Altura del recipiente = 385 mm.

Altura de la chapa del pistón = 5 mm

Altura del colchón de caña dentro del recipiente = $0,001(385 - h_m) = h_c$ (en m)

h_m es la altura que se mide entre la parte superior del pistón y el borde superior del recipiente (en mm). Esta dimensión debe ser tomada como el promedio de 4 lecturas realizadas a 90° unas con respecto a las otras por todo el borde del recipiente, de manera que si se denominan respectivamente h_1 ; h_2 ; h_3 y h_4 a estas lecturas, entonces:

$$h_m = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \quad (2.7)$$

Diámetro del recipiente = 1 pie = 304,8 mm. = 0,3048 m

Volumen de material en el recipiente

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_c = 0,785 \cdot 0,3048^2 \cdot h_c = 0,073 \cdot h_c \quad (2.8)$$

este volumen estará dado en metros cúbicos.

Masa del pistón más el recipiente = 15,5 kg. (valor fijo)

Masa de la muestra dentro del recipiente = W_m

La masa de la muestra dentro del recipiente será igual a la masa total del conjunto (W_t) menos el masa del pistón y el recipiente ($W_m = W_t - 15,5$)

La densidad del material estará dada por la relación entre el peso de la muestra y su volumen.

$$\rho = \frac{W_m}{V} \quad (2.9)$$

La cantidad de pruebas realizadas no fueron lo suficientemente grandes para hablar de valores absolutos por lo que se refieren aquí los valores promedios obtenidos.

Para caña azucarera la relación obtenida se muestra como promedio en la siguiente tabla.

Tabla 4 Valores de índice de preparación y densidad volumétrica.

Caña azucarera	Índice de preparación	Densidad volumétrica (lb/pie ³)
Promedio	61.78	15.61

Debido a las pocas horas que se molió la caña energética no se pudo determinar estos dos parámetros: ni índice de preparación ni densidad volumétrica .

2.3 -Fibra de entrada, bagazo % caña y humedad de salida del bagazo.

Los resultados obtenidos a lo largo de la investigación en cuanto a fibra de entrada , bagazo % caña y humedad de salida del bagazo se muestran en una tabla que resume los mismos.

Tabla 5 Valores de fibra de entrada, bagazo % caña y humedad de salida del bagazo.

Parámetros	Caña energética	Caña azucarera
Fibra de entrada	33.16	12.34
Bagazo %caña	69.24	27.36
Humedad de salida	49.24	50.034

En los anexos (13,14 y 15) se puede observar mediante gráficas los resultados de todas las mediciones de fibra, bagazo % caña y humedades de salida.

La tabla 5 nos muestra los datos comparativos tanto para caña azucarera como para caña energética, donde la fibra de entrada de caña energética es casi el doble que para caña azucarera, el bagazo % caña de la caña energética es al igual que la fibra, casi el doble. Las humedades oscilan en valores cercanos.

2.4 Granulometría del bagazo.

La molienda de la caña tiene como objetivo fundamental extraer el máximo de sacarosa, pero al mismo tiempo debe entregar el bagazo para combustible y producción de derivados.

Es conocido que la composición de la fibra en la caña de azúcar es aproximadamente como sigue:

55-60 % de médula o meollo.

40-45 % de fibra dura de médula o meollo.

En el bagazo, al final del tandem, no está separada toda la médula de la fibra dura: se puede observar con facilidad que junto al haz de fibra dura se encuentran adheridas las partículas de médula. Un objetivo importante es la máxima separación posible.

Para obtener 96 % o más de extracción de pol es necesario que la rotura de celdas en el bagazo también alcance ese valor, es decir, 96-97 % . Para lograrlo es necesario tener una buena preparación de la caña, pero al mismo tiempo que los molinos hagan su trabajo y que lo hagan bien.

Se puede alcanzar buena extracción con mala preparación, pero no se puede lograr una buena extracción de pol si los molinos trabajan mal.

La técnica analítica para determinar los % de meollo y fibra dura es la siguiente:

1. Tomar una muestra representativa.
2. Secar el bagazo a peso constante.
3. Tamizar la muestra seca durante 20 minutos utilizando un tamiz de 3 mm de diámetro de perforación para separar la fibra dura del meollo y pesarlo.
4. Tamizar la fibra dura por un período de 20 minutos utilizando un tamiz de 6 mm de diámetro de perforación y pesarla.
5. Determinar el % de cada componente.

La granulometría del bagazo es un indicador importante para conocer las condiciones físicas que tiene y trabajar en condiciones de máxima extracción de pol y buenas condiciones para la combustión y para la producción de derivados.

La granulometría del bagazo permite evaluar el comportamiento de los molinos, partiendo de valores conocidos del índice de preparación ya que permite conocer la incidencia de la presión hidráulica y del rayado de las mazas y evaluar el comportamiento

del tandem con diferentes cantidades en el agua de imbibición.

Es conocido que el valor calórico de la médula y la fibra dura es similar, sin embargo, para poder quemar el bagazo fino en una caldera, es necesario que las pérdidas por incombustión mecánica (arrastre) sean mínimas. Se requiere estudiar el comportamiento en los diferentes tipos de hornos de que se dispone.

Por todo lo expuesto anteriormente, en esta investigación se decidió conocer en qué valores se encuentra la granulometría del bagazo en el tandem del CAI “Melanio Hernández”, para eso se realizaron varias corridas tanto con caña azucarera y caña energética.

A continuación se muestran los promedios de fibra dura meollo para la caña azucarera

Tabla 6 Valores de Fibra dura / meollo para caña azucarera.

Caña azucarera	Molino 3	Molino 4	Molino 5
Fibra dura/meollo	1.09078964	0.87519775	0.70004

Tabla 7 Valores de Fibra dura / meollo para caña energética.

Caña energética	Molino 3	Molino 4	Molino 5
Fibra dura/meollo	1,62329486	1,55885363	1,08681135

En las tablas 5 y 6 se muestran los valores de fibra dura/meollo y se puede apreciar que los valores de caña energética son una vez y media más que los de caña azucarera esto es debido a que la caña energética tiene aproximadamente el doble de fibra que la azucarera esto facilita en gran medida la combustión en las calderas no así la extracción en el tandem.

Se considera que un valor mínimo de 0,60 para la relación fibra dura/meollo es aceptable tanto para la extracción de pol como para la combustión. Es decir, 60 % de fibra dura y 40 % de meollo en composición en el bagazo.

La composición de fibra dura debe ser como sigue: 50 % sobre tamiz de 6 mm de diámetro y 50 % pasando por él. Cuando la cantidad de fibra dura sobre tamiz de 6 mm sobrepasa el 50 % de su peso total, indica que los molinos no están trabajando bien.

2.5 Algunos datos obtenidos para la caña energética.

Como se ha planteado al principio del capítulo, el último día de zafra se hizo una prueba con caña energética y aunque el poco tiempo que la misma fue procesada no permitió desarrollar las mismas pruebas que se hicieron con la caña azucarera se brindan a

continuación los datos obtenidos y la comparación de algunos parámetros entre ambas variedades :

Tabla 8 Indicadores

<i>Indicadores</i>	<i>UM</i>	<i>Caña azucarera</i>	<i>Caña energética</i>
<i>Densidad de caña</i>	<i>t / m³</i>	<i>0.263</i>	<i>0,156</i>
<i>Peso por carro</i>	<i>t</i>	<i>21.874</i>	<i>12.97</i>
<i>Fibra en caña</i>	<i>%</i>	<i>12.34</i>	<i>33.16</i>
<i>Bagazo en caña</i>	<i>%</i>	<i>27.37</i>	<i>69.24</i>
<i>Bagazo por carro</i>	<i>t</i>	<i>5.98</i>	<i>8.97</i>

Relación de capacidad de carga (caña energética / azucarera).....59.3 %

Relación transporte bagazo (Caña energética / azucarera)150 %

Incremento del transporte.....41 %

Incremento de bagazo transportado por carro.....50 %

Debe notarse el bajo peso de la caña energética a pesar de estar bien cargados los carros en sentido general.

Tabla 9 Resultados obtenidos

<i>Concepto</i>	<i>UM</i>	<i>Caña azuc.</i>	<i>Caña energ.</i>	<i><u>Energ. /Az. (%)</u></i>
<i>Molida horaria</i>	<i>tch</i>	<i>214.3</i>	<i>109.25</i>	<i>51</i>
<i>Potencia consumida en motor 1+3</i>	<i>Kw.</i>	<i>1190</i>	<i>1080</i>	<i>100.8</i>
<i>Pol en bagazo</i>	<i>%</i>	<i>3.49</i>	<i>1.35</i>	<i>38.7</i>
<i>Humedad del bagazo</i>	<i>%</i>	<i>49.92</i>	<i>49.24</i>	<i>98.6</i>
<i>Extracción total de Pol</i>	<i>%</i>	<i>93.13</i>	<i>81.25</i>	<i>87.3</i>

Tabla 10 Indicadores

<i>Indicadores</i>	<i>UM</i>	<i>Caña azucarera</i>	<i>Caña energética</i>	<i>Diferencia</i>
<i>Caña molida</i>	<i>tch</i>	<i>214.3</i>	<i>109.25</i>	<i>105.05</i>
<i>Fibra en caña</i>	<i>%</i>	<i>12.34</i>	<i>33.16</i>	<i>20.82</i>

Fibra molida	t/h	26.44	36.22	9.78
Energía consumida	Kwh.	1190	1080	110
Índice de consumo	Kwh./tf	23.87	17.56	6.30

También se observa una igualdad en la demanda de potencia durante la molida de caña energética, debiéndose notar que en esta ocasión, pudimos hacer uso de un analizador de redes en las mediciones.

Toda la caña energética se transportó por FFCC y en total fueron 34 carros con un total de 432 t. Del total de carros se hicieron un muestreo en 23 .

Durante la molida de la caña energética el tandem no tuvo ningún inconveniente y solo se puede consignar que este año se molió con un molino menos pues se eliminó el molino 2 por decisión del Central.

2.6 Valoración económica

Como el CAI “Melanio Hernández “ fue uno de los centrales escogidos para continuar operando, es necesario investigar si el mismo es rentable y uno de los aspectos a evaluar son las pérdidas por una baja extracción en el tandem, esto es, cuanto representa el incremento de la pol en bagazo de una zafra a otra.

Como se ha incrementado el % de pol en bagazo de un 1,75 a un 2,5 equivalente a un 0,75 % a continuación se mostrará con una serie de datos del ingenio a cuanto equivalen estas pérdidas en USD para una zafra de 100 días.

A continuación se calcula a cuanto equivale el aumento de pol en bagazo de una zafra a otra. Se tomará la siguiente nomenclatura:

M- capacidad de molida en toneladas/hora.

B.C.- bagazo en caña

I –Incremento de la pol en bagazo (en fracción).

H- horas que tiene un día

D- días que tiene una zafra

A -Tm de pérdidas de azúcar.

P-precio del azúcar

Pt - perdidas en U.S.D

L- libras que tiene una Tm de azúcar

$$A = M * B.C. * I. * H * D \quad (2.10)$$

$$M = 400\,000 @ / \text{día} (191,5 \text{ Tm de caña/hora})$$

$$B.C. = 30\%$$

$$\%I. = 0.75\%$$

$$H = 24 \text{ horas/día}$$

$$D = 100 \text{ días}$$

$$P = 0,1 \text{ U.S.D/lbs}$$

$$L = 2200 \text{ lbs/Tm}$$

$$A = 191,5 \text{ Tm de caña/hora} * 0,3 * 0,0075 * 24 * 100$$

$$A = 1034,1 \text{ Tm de azúcar.}$$

Es decir que las pérdidas de azúcar en una zafra debido al incremento de la pol son de 1034,1 Tm de azúcar.

$$Pt = A * L * P \quad (2.11)$$

$$Pt = 1034,1 * 2200 * 0,1$$

$$Pt = 227\,502 \text{ USD}$$

entonces las pérdidas equivalentes serían de 227 502 USD.

Conclusiones parciales

- Como se puede apreciar el por ciento fibra de la caña energética es 20.82% superior al por ciento fibra de la caña azucarera , lo que influye directamente en la reducción de 105.05 toneladas de caña molida por hora, a pesar de mantenerse moliendo a un mayor ritmo de fibra horaria en caña energética.
- Según los resultados obtenidos en las muestras de fibra dura/meollo se llegó a la conclusión de que la caña energética tiene mayor fibra dura debido a que su composición por naturaleza es de mayor fibra que la azucarera y que sobrecumple los valores de relación recomendados por el manual de Planta Moledora [42] , lo cual es favorable para la generación aunque dificulta la extracción.
- ***Los resultados obtenidos tanto para la fibra de entrada como para bagazo % caña para la caña energética son el doble que para la caña azucarera..***

- *En el caso de humedad de salida del bagazo para ambas cañas energética y azucarera es muy similar.*
- *En el caso de los valores de índice de preparación obtenidos para la caña azucarera están alrededor de 60,1% debido a la mala preparación de la superficie de corte de las cuchillas en el momento en que se realizaron las mediciones. Los valores recomendados en la literatura son más elevados si se desea obtener una buena extracción en el tandem.*
- *Según los resultados obtenidos en los cálculos de extracción relativa se puede señalar que la maza cañera extrae el 72% del jugo en el último molino y para este valor se considera que trabaja satisfactoriamente.*
- *Los valores de extracción por molino son similares a los recomendados por la literatura.*
- *Se concluye que los elevados valores de pol en bagazo se deben a un bajo índice de preparación en las cuchillas y a problemas operacionales (disciplina tecnológica)que no se veían presentes durante las corridas pero que ocurrieron a lo largo de la zafra. Estas dificultades ocasionaron al ingenio pérdidas de los 227 502 USD. A esto se une el hecho de que en esta zafra el tandem operó con un molino menos sin que disminuyera la capacidad de operación.*

Capítulo III

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA MECÁNICA DEL TANDEM.

En este capítulo se desarrolla un diagnóstico de los molinos del CAI "Melanio Hernández" : por el Manual de Planta Moledora [42] se determinan los valores óptimos de molienda y por el método desarrollado por Pérez [50] se determinan los valores de capacidad, ajustes (setting), consumo de potencia, índices de consumo por tonelada métrica de caña molida y de fibra procesada así como la eficiencia mecánica de cada una de las unidades de molienda y del tandem en su conjunto. Se midieron los valores reales de consumo en dos de los motores que mueven el tandem, se procesaron estadísticamente y se compararon con los valores obtenidos por el diagnóstico.

3.1 Importancia del desarrollo de diagnósticos en un tandem.

Debido al desbalance entre los costos y el resultado de su producción una parte de los centrales de Cuba han tenido que cerrar .

Es importante destacar que por cada tonelada de caña que se muele en un central se producen 0,3 toneladas de bagazo, y con esta cantidad de combustible es posible generar en las condiciones actuales entre 15 y 20 kW-h. Dentro de unos años este valor puede ser duplicado, pero en las condiciones actuales: con calderas de baja presión y sin la utilización de turbinas de condensación no es posible generar más electricidad en la planta eléctrica.

Por todo esto es imprescindible que el gasto de energía necesario para la molienda sea lo más bajo posible. Hay que tener en cuenta que el consumo en los molinos es solo una parte del consumo total de electricidad y al mismo deben añadirse los necesarios para la recepción, preparación y transportación de la caña y el bagazo así como el bombeo de los productos líquidos.

Es indispensable que cada central sea capaz de disminuir los valores de consumo por tonelada de caña molida. Uno de los factores que tiene más influencia en este sentido es el aprovechamiento de la capacidad potencial de molienda. Cuando un molino se mueve en vacío pero con la presión hidráulica aplicada consume una cantidad de energía que

depende de las pérdidas friccionales que se produzcan en el equipo. A medida que el espesor de colchón aumenta, se incrementa este consumo, pero al mismo tiempo se incrementa la cantidad de caña que se muele y al mismo tiempo disminuye el consumo específico o índice de consumo por tonelada de caña molida. Es necesario que la molida alcance un valor en el cual la extracción tenga valores aceptables y al mismo tiempo el índice de consumo por tonelada de material que se procesa tenga un valor mínimo.

El objetivo de este capítulo es determinar el valor de molida óptima recomendada en el CAI “Melanio Hernández” y compararla con los valores reales que se alcanzaron en la zafra 2002-2003.

Para cumplir este objetivo se emplearon dos métodos de diagnóstico: El del factor de grueso de colchón que se recomienda en el Manual de Planta Moledora [42] y el método desarrollado por Pérez [50] .

3.2 Cálculo por el método de grueso del colchón (tomado de [42]).

Cada autor en la literatura azucarera clásica prácticamente presenta una ecuación con la que se pretende calcular, de forma directa y única, la capacidad de una planta moledora. Ese pudiera no ser el enfoque más correcto del problema ya que una planta moledora es una instalación muy flexible en cuanto a su capacidad y ésta representa un valor de compromiso entre capacidad de caña a moler y extracción de pol, téngase en cuenta además que esta operación debe realizarse sin que los equipos corran peligros de roturas ya que su reparación es muy costosa y paraliza la producción. .

Una misma planta moledora puede alcanzar altos valores de molida sacrificando la extracción y, a la inversa, puede optimizarse la extracción sacrificando el volumen de molida. Por tanto la solución del problema está en determinar el valor de compromiso donde la planta moledora puede asimilar el mayor volumen posible de caña con valores razonables de extracción de sacarosa, teniendo como premisa fundamental la eficiencia económica.

El camino correcto a seguir es analizar todos los elementos que concurren en la planta moledora objeto de estudio y determinar el nivel de capacidad óptimo, de acuerdo a sus posibilidades, para compararlo posteriormente con el grado de explotación real a que está sometido.

Diversos autores recomiendan expresiones diferentes para el cálculo de la capacidad de molida de un tandem.

Para un análisis más objetivo se emplea la comparación entre el "Factor de grueso de colchón óptimo" (Go) de un tandem y el (Greal) con el cual opera actualmente.

Si ambos números son iguales o semejantes, la planta moledora opera en su rango de capacidad correcto, y existe un compromiso aceptable entre la cantidad de caña molida y la extracción.

Si el Factor de Grueso del colchón real fuera mayor que el óptimo, el tandem estaría sobrecargado, sacrificando eficiencia en aras de la cantidad de caña molida.

Por el contrario si el Factor de Grueso del colchón real fuera menor que el óptimo, se tiene la indicación de que el tandem está moliendo por debajo de sus posibilidades y que puede optimizarse la eficiencia.

El problema se reduce a encontrar el "Factor de Grueso del Colchón Óptimo" (Go) para cada planta moledora.

3.2.1. Elementos a considerar para determinar el factor de grueso de colchón óptimo (Go).

Las posibilidades óptimas de explotación (Carga) de un tandem están dadas por las siguientes características particulares:

- 1.- Equipos de preparación de caña.
- 2.- Sistemas de alimentación.
- 3.- Robustez de las unidades de molida en función del área proyectada de collarines y del largo de las mazas.

3.2.2. Cálculo del factor de grueso de colchón óptimo (Go).

$$Go = K.Gn \quad (3.1)$$

donde:

K - Factor que depende de la preparación de la caña y la capacidad de alimentación del tandem.

Gn - Factor del grueso del colchón nominal, dado por el nomograma de la figura 3.1, donde se analizan todas las otras condicionales del tandem.

Valores de K.

K = 1,00 si el tándem no tiene alimentadores forzados

K = 1,20 si hay alimentador forzado pesado de cuarta maza con tambor de hierro fundido en todas las unidades de molida y aspereza en las cuatro mazas.

K = 1,40 si hay tolva Donnelly con alimentadores forzados pesados de cuarta maza en todas las unidades de molida o, por lo menos, en la primera y última unidad, con ambos sistemas y el resto con cuarta maza solamente. Todas las unidades con aspereza en las cuatro mazas.

K = 1,80 si existe desfibradora extrapesada, tolva y cuarta maza en todas las unidades, con aspereza en las cuatro mazas.

Valores de Gn.

Gn se determina mediante el nomograma de la figura 3.1. Para trabajar con el nomograma se necesitan tres parámetros:

- Molinos equivalentes.
- Area proyectada de collarín en pulgadas cuadradas.
- Largo de mazas en pulgadas.

Molinos equivalentes.

Es un factor del tandem que se determina por la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Valores del coeficiente de molinos equivalentes.

Equipo	Molinos equivalentes
Desmenuzadora	0,50
Molinos de tres mazas	1,00
Cuchilla	0,50
Cuchilla intermedia	0,25
Doble juego de cuchillas	0,75
Doble desmenuzadora	1,00
Desfibradora ligera	1,00

Número de molinos equivalentes, igual a la suma de los elementos que se obtengan de esta tabla.

Area proyectada de collarín

$$APC = D.L \tag{3.2}$$

donde:

APC - área proyectada de collarín en pulgadas cuadradas.

D - diámetro del collarín en pulgadas.

L - largo del collarín en pulgadas.

El largo de maza en pulgadas se explica por sí solo.

Este nomograma fue tomado en el sistema inglés por lo que se han respetado aquí las unidades.

3.2.3. - Cálculo del factor de grueso de colchón real (Greal).

El factor de grueso de colchón real se determina por la expresión:

$$G_{real} = \frac{M \cdot f}{24LV} \quad (3.3)$$

donde:

Greal - factor de grueso de colchón real en (@s de fibra/hora)/(pie cuadrado de maza/min).

M - molida diaria en @s/día

f - fracción de fibra en caña.

L - largo de mazas en pies.

V - velocidad tangencial de las mazas del primer molino, en su diámetro medio en pies/min.

3.2.4.-Posibilidades de molida óptima (Mo).

Si se despeja M en (3.3) y se coloca Go en lugar de Greal se tendrá la expresión de la molida óptima en la expresión:

$$Mo = (Go \cdot 24 \cdot L \cdot V) / f \quad (3.4)$$

donde:

Mo - Posibilidad de molida óptima del tandem en @s/día.

Los demás parámetros son conocidos.

3.2.5.-Diagnóstico de un tandem.

El diagnóstico de un tandem puede expresarse a través de la tabla siguiente:

Tabla 3.2. Diagnóstico del tandem.

Comparación entre el	Diagnóstico del tandem
----------------------	------------------------

valor de Greal y el de Go.	
$G_{real} > 1,1 G_o$	El tandem está sobrecargado con tendencia a disminuir eficiencia y aumentar roturas.
$G_{real} = G_o (\pm 10\%)$	El tandem está operando a su capacidad correcta.
$G_{real} < 90\% \text{ de } G_o$	El tandem está subutilizado y gastando recursos inútilmente.

Estos criterios pueden ser de mucha utilidad para ayudar a seleccionar las relaciones entrada/salida dinámicas al calcular los ajustes.

Si se tienen los datos físicos de un tandem y se desea obtener la capacidad de molienda para un buen trabajo del mismo, se sigue el proceso inverso, esto es:

- a) Con las dimensiones de los collarines, la longitud de maza y el número de molinos equivalentes se localiza en la figura 3.1 factor de grueso de colchón (G_n).
- b) Se determina el valor de K que corresponde al tandem que se está estudiando.
- c) Se calcula el factor de grueso de colchón óptimo (G_o) para este tandem por la expresión (3.1).
- d) Se iguala el factor de grueso de colchón óptimo al factor de grueso de colchón real que se desea obtener en el tandem.
 - e) Se despeja el valor de la molienda en la expresión (3.3) y teniendo como dato el valor de G_{real} obtenido en d).

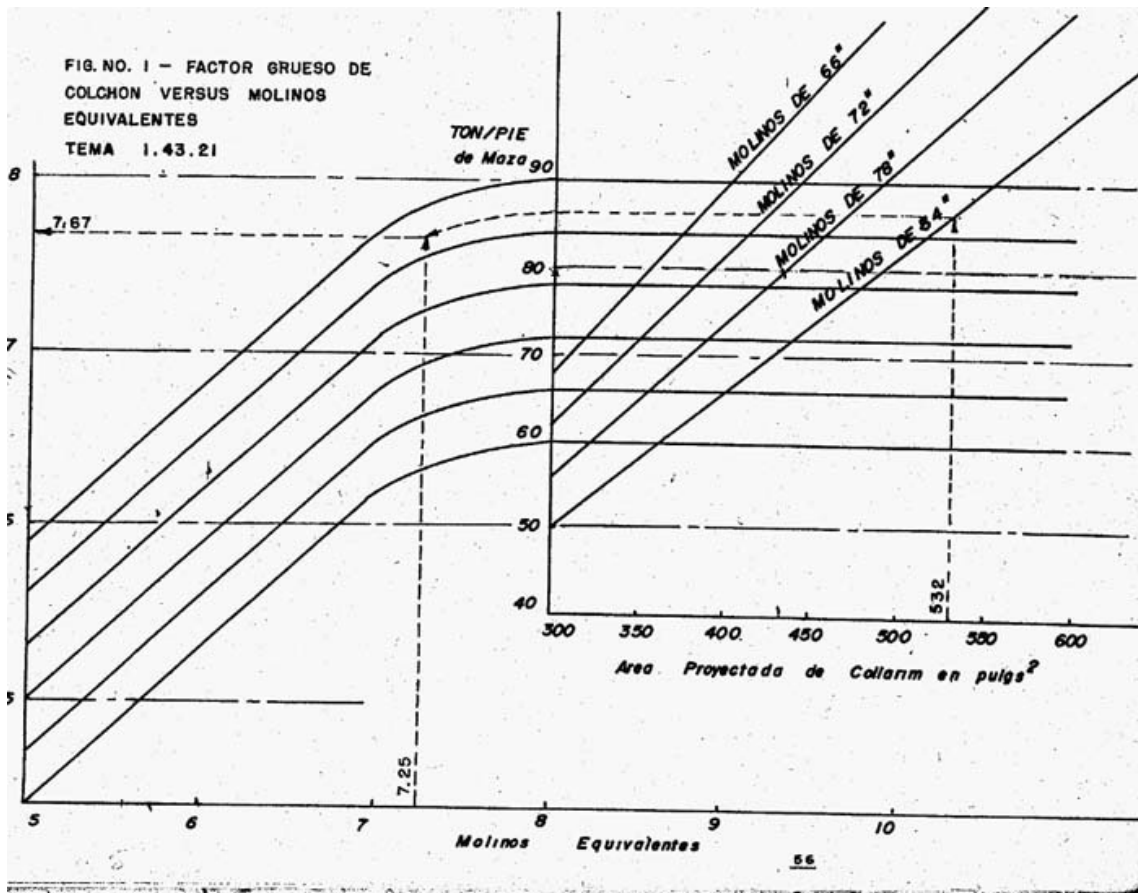


Figura 3.1 Factor de grueso de colchón nominal.

3.2.6 Aplicación del método para el tandem del CAI "Melanio Hernández"

Calculo del (G_0): Aplicando la expresión (3.1)

$$G_0 = K * Gn$$

Valor de K:

Se tomó

$K = 1.40$ ya que existe alimentador forzado pesado con 4^{ta} maza con tambor de hierro fundido y tolva Donnelly en la primera y ultima unidad (en este caso todos los molinos poseen tolva Donnelly, excepto el tercero).

De la tabla 3.1 y considerando 5 molinos y dos juegos de cuchillas se tomó un valor de 5,75 molinos equivalentes

Área proyectada del collarín:

APC = (Diam. Del collarín) * (Largo collarín).

APC = (18 pulg * 24 pulg).

APC = 432 pulg².

El área proyectada es de 432 pulg².

Con estos dos valores y la longitud de los molinos, que es de 84 pulgadas se obtuvo un factor de grueso de colchón nominal de 5,7 (@s de fibra /hora) / (m²/min)

Para calcular el factor de grueso de colchón óptimo se multiplicó el factor de grueso de colchón nominal por 1,4. El resultado fue

$$G_0 = 1.40 * 5,7$$

$$G_0 = 7,98 (@s de fibra /hora) / (m^2/min)$$

Cálculo del factor de grueso de colchón real

Para calcular el grueso de colchón real se consideró la expresión (3.3)

$$G_{real} = \frac{M \cdot f}{24LV}$$

M - molida del CAI, en nuestro caso, 400000@s/día

f - fibra en caña esperada 0.145.

L - Longitud de las mazas 7,5 pie

V - Velocidad tomando un promedio 10,89 m/min * 3.28pies/m = 35,8 pie/min

$$G_{REAL} = \frac{400000 * 0.145}{24 * 7,5 * 35,8}$$

$$G_{REAL} = 9,00 (@s de fibra /hora) / (m^2/min)$$

Al dividir el factor de grueso de colchón real sobre el factor de grueso colchón óptimo se tiene

Dividiendo el valor de G_{REAL}/G_0 o sea $9.00 / 7,98 * 100$ da un 112% por lo que el tandem está sobrecargado con tendencia a disminuir la eficiencia y aumentar la rotura.

Posibilidades de molida óptima

Para calcular cuál sería la molida óptima se puede despejar M de la expresión (3.3) pero colocando el valor del factor de grueso de colchón óptimo:

$$M_0 = \frac{G_0 * 24 * L * V}{f}$$

Donde M_0 es la posibilidad de molida óptima del tandem.

$$M_0 = \frac{7,98 * 24 * 7,5 * 35,8}{0.145}$$

$$.M_0 = 354\ 642 \text{ @s/día.}$$

$$\frac{400000 - 354642}{400000} * 100 = 11,33 \%$$

Cuando se lleva a cabo el análisis que se plantea en la tabla 3.2 se nota que la molida real sobrepasa en más de un 10 % a la molida recomendada por el diagnóstico por lo que esta puede ser una de las causas de los elevados valores de pol en bagazo obtenidos.

3.3 Cálculo por el método desarrollado por Pérez [50].

Este método se basa en el hecho, destacado por algunos autores [25] de que existe una estrecha correlación entre los factores que intervienen en el consumo de potencia de un molino y del tandem en su conjunto y aquellos mediante los cuales se alcanza una capacidad potencial de molida determinada.

Los elementos más importantes son:

- Las propiedades de la materia prima (fibra en caña, nivel de preparación).
- La magnitud de las mazas (diámetro, longitud, rayado)
- Los parámetros de trabajo de cada molino (velocidad angular, presión hidráulica).

Con estos elementos y el número de unidades de molida el programa es capaz de calcular la capacidad potencial del tandem. Pero para continuar los cálculos es necesario que se suministre el dato de capacidad real que puede o no coincidir con la recomendada, aunque lo ideal es que esto suceda.

El sistema partió de los datos físicos de cada uno de los molinos y de la fibra esperada en la caña, con estos elementos se calculó la capacidad potencial mediante la siguiente expresión:

$$Q = 0,9 \frac{c.n.(1 - 0,06n.D).L.D^2 \sqrt{N}}{f} \quad (3.5)$$

que ha sido tomada de [26]

donde:

Q – capacidad de molida en toneladas de caña/hora.

c – coeficiente relativo a los equipos de preparación.

n – velocidad angular de las mazas, en rev/min.

L – longitud de las mazas, en m.

D – diámetro promedio de las mazas del tandem, en m.

N – número de mazas en el tandem .

f – fibra de la caña con relación a la unidad.

El coeficiente relativo a los equipos de preparación puede ser tomado de acuerdo con la tabla siguiente:

Tabla 3.3 .Valores del coeficiente c.

Equipo de preparación.	Valor de c
1 juego de cuchillas de paso ancho.	1,10
2 juegos de cuchillas de paso ancho.	1,15
1 juego de cuchillas de paso estrecho.	1,13
2 juegos de cuchillas (uno ancho y uno estrecho).	1,16
2 juegos de cuchilla y una desmenuzadora.	1,22
Desmenuzadora con caña mecanizada.	1,18

A partir de estos datos el programa calcula las aberturas de trabajo que se recomiendan para alcanzar la molida real que se ha fijado en el párrafo anterior y con los parámetros calculados hasta allí puede calcular también el consumo de potencia esperado, el índice de consumo o consumo específico por tonelada de caña molida y por tonelada de fibra procesada así como le eficiencia, para cada molino y para el tandem es su conjunto. La capacidad calculada en esta expresión se multiplicó por 87 y por 24 para convertirla @s de caña/día. Todos estos datos fueron determinados en hojas de Excel.

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los resultados obtenidos para el CAI "Melanio Hernandez".

Tabla 3.4 Diagnóstico del tandem. CAI "Melanio Hernandez"

	1M	2M	3M	4M	5M
1Unidad de molida					
2Paso del rayado maza superior (mm)	100	75	38	38	38
3Angulo del rayado maza superior	45	45	50	50	50
4paso del rayado maza inferior (en mm)	100	75	75	75	75
5Angulo del rayado maza inferior	40	45	45	45	35

6	Fibra % caña (fracción)	0.145					
7	Vel. Ang. eq. Mot.(rev/min)	700	600	600	600	600	
8	Potencia de Chapa de los motores (kW)	500	800	800	800	800	
9	Relac. total de transmisión	193.7	159.7	162.6	167.80	167.80	
10	Largo de las mazas (m)	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	
11	Veloc. Ang.mazas (rev/min)	3.61	3.76	3.69	3.58	3.58	
12	Diam. ext. maza mot. (m)	1.029	1.016	0.991	1.016	0.991	
13	Profundidad del rayado de la maza mot.(m)	0.102	0.075	0.032	0.032	0.032	
14	Diam. med. maza mot. (m)	0.927	0.941	0.959	0.984	0.959	
15	Vel. Lin. maz.mot. (m/min)	10.53	11.10	11.11	11.05	10.77	
16	Capacidad de Molida (calculada)en @s/día	378675					
17	Capacidad de molida (ajustada), en @s/dia	400000					
18	Tm de fibra/min.	0.46					
19	Entrada/Salida moliendo	1.50	1.69	1.90	2.13	2.40	
20	Punta de cuchilla /entrada moliendo	1.40	1.48	1.57	1.66	1.75	
21	Volumen unitario en la salida (m ³ /Tm)	2.5	2.05	1.67	1.37	1.12	
22	Volumen unitario en la entrada	3.75	3.45	3.17	2.92	2.69	
23	Volumen unitario en la punta de la cuchilla	5.25	5.11	4.97	4.83	4.70	
24	Volumen req. en la entrada (m ³ /min)	1.74	1.60	1.47	1.35	1.24	
25	Volumen requerido en la salida	1.16	0.95	0.77	0.63	0.52	
26	Volumen requerido en la punta cuchilla	2.43	2.36	2.30	2.24	2.18	
27	Superf de Maz. (m ² /min)	22.42	23.65	23.67	23.54	22.94	
28	Ajuste din. a la ent. (mm)	77.4	67.5	62.1	57.5	54.2	
29	Ajuste din. a la sal. (mm)	51.6	40.0	32.7	26.9	22.6	
30	Ajust. Din punt. Cuch. (mm)	108.4	100.0	97.2	95.1	94.9	
31	Flotac. maza superior (mm)	12	12	10	10	10	
32	Variación abertura/flotación entrada	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
33	Variación de abertura entrada (mm)	7	7	6	6	6	
34	Variación de abertura/flot. salida	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	
35	Variación de abrtura salida (mm)	11	11	9	9	9	
36	Punta de cuch. VS Flotac.	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
37	Variación punta cuchilla	7.2	7.2	6.0	6.0	6.0	
38	Entrada en vacío (mm)	70.2	60.3	56.1	51.5	48.2	
39	Salida en vacío.	44.4	32.8	26.7	20.9	16.6	
40	Punt de cuch. en vacío (mm)	101.2	92.8	91.2	89.1	88.9	
41	Factor de reabsorción.	1.25	1.16	1.18	1.26	1.36	
42	Fuerza Hidráulica total admisible TM (64*L)	447	447	447	447	447	
43	Potencia para esta presión (kW)	462.62	372.57	359.98	360.23	357.73	1913.13
44	Pres. Hidr. Espec.Recommend. (TM/dm ²)	20.00	19.00	19.00	20.00	21.00	
45	Fuerzas hidráulicas recomendadas. TM	395.00	380.68	388.02	419.09	428.86	
46	Pres. Hidr. en la línea (lbs/pulg ²)	3800.00	3700.00	2300.00	3600.00	2600.00	
47	Diámetro de los pistones (pulg)	12.00	12.25	12.25	12.25	15.00	
48	Fuerza hidráulica total real TM	390.50	396.23	246.31	385.52	417.48	
49	Pot. calculada (kW)	355.22	290.49	179.83	273.70	293.16	1392.38
50	Cons. espec. calculado (kW-h/Tm de caña)	1.85	1.52	0.94	1.43	1.53	7.27

51	Cons. espec.calculado (kW-h/Tm de fibra)	12.79	10.46	6.47	9.85	10.55	50.73
52	Potencia calc en la Comp. del bagazo (kW)	170.99	111.43	64.33	101.51	111.48	559.73
53	Eficiencia mecánica calculada.	0.48	0.38	0.36	0.37	0.38	0.40

Si se compara el valor de capacidad obtenido por este método, que es de 378 675 @s/día. con la capacidad real en esta zafra se observa una diferencia de casi 22 000 @s/día. Esta diferencia es algo menor que la que se obtuvo con el Manual de Planta Moledora. Como se nota, por dos métodos completamente distintos se ha llegado a la misma conclusión y es que este ingenio molió en esta zafra por encima de su capacidad potencial, lo cual puede haber influido en los bajos niveles de extracción obtenidos.

En cuanto a los ajustes entre mazas (setting) los valores obtenidos en la tabla se acercan a los que se situaron en el central en esta zafra.

La fuerza hidráulica total admisible se tomo sobre la base de las recomendaciones para los cálculos del Manual de Planta Moledora [42] y estos valores se aceptan en todos los molinos ya que las reales están por debajo de las de trabajo excepto en el molino número tres, que por no poseer tolva alimentadora se le disminuyó la presión hidráulica ya que presentaba problemas de atoros.

En cuanto al consumo de potencia por molino y el total de la batería . Estos valores aparecen en la fila # 49 de la hoja de Cálculo en Excel. El valor de consumo total calculado fue de 1485,21kW.

3.4 Lecturas reales de consumo en el tandem.

Solamente se procesaron las lecturas de consumo para el primer motor (que mueve el primer molino) y para el motor # 3 (que mueve los molinos 4 y 5) ya que las lecturas de consumo del segundo motor no fueron confiables.

Tabla 3.5 Lecturas de consumo. CAI "Melanio Hernandez"

fecha	hora	Motor # 1	Motor # 3
12/3/03	1.05 PM	420.00	708.00
	1.25 PM	464.00	700.00
	1.45 PM	418.00	694.00
	2.05 PM	440.00	638.00
	2.25 PM	466.00	626.00
	2.45 PM	418.00	628.00
	3.05 PM	466.00	626.00

13/03/03	8.05 AM	414.00	698.00
	8.25 AM	418.00	700.00
	8.45 AM	390.00	700.00
	9.05 AM	400.00	698.00
	9.25 AM	442.00	694.00
	9.45 AM	428.00	708.00
	10.05 AM	444.00	690.00
	1.05 PM	444.00	610.00
	1.25 PM	432.00	700.00
	1.45 PM	440.00	698.00
	2.05 PM	444.00	690.00
	2.25 PM	390.00	698.00
	2.45 PM	390.00	626.00
	3.05 PM	466.00	698.00
14/03/03	9.15 AM	428.00	694.00
	9.35 AM	390.00	628.00
	9.55 AM	414.00	700.00
	10.15 AM	426.00	698.00
	10.35 AM	390.00	700.00
	10.55 AM	426.00	634.00
	12.15 AM	468.00	698.00
	1.05 PM	440.00	694.00
	1.25 PM	444.00	618.00
	1.45 PM	444.00	624.00
	2.05 PM	456.00	698.00
	2.25 PM	442.00	624.00
	2.45 PM	468.00	636.00
	3.05 PM	448.00	700.00
16/03/03	10.00 AM	442.00	698.00
	10.20 AM	458.00	700.00
	10.40 AM	420.00	700.00
	11.00 AM	392.00	698.00
Promedio		431.54	676.15
Dispersión		24.53	33.95
Coef. De var. calc.(V, %)		5.68	5.02

Se obtuvieron un total de lecturas considerables (39), las cuales se procesaron estadísticamente. Para ello se le determinó el promedio, la dispersión y el coeficiente de variación calculado. Este procesamiento estadístico dio como resultado que se pueden tomar los promedios como valores representativos ya que el coeficiente de variación calculado es menor que el teórico obtenido para esta cantidad de lecturas.

Coefficiente de variación teórico. Este coeficiente fue calculado como:

$$V_t = \frac{e * \sqrt{n}}{1.96} \quad (3.6)$$

Esta expresión fue tomada de [56]

donde:

e - % de error que se considera aceptable para un 4 %

n – número de lecturas.

Sustituyendo valores se tiene

$$V_t = (4 * n^{1/2}) / 1.96$$

Para n = 39 lecturas y un % de error relativo (e) de 4 (considerado un valor medio), así como un 95 % de posibilidad.

$$V_t = 12,74$$

El coeficiente de variación real para cada caso es inferior al teórico lo que demuestra que existe una buena reproducibilidad de los resultados en los experimentos.

En el caso del primer motor las lecturas de consumo reales fueron un 12 % menores que las calculadas y en el tercer motor fueron un 10 % menores que las calculadas. Esto se debe a que los valores de presiones hidráulicas reales observadas en todos los casos estuvieron por debajo de los previstos.

3.5 Tendencias en el comportamiento de algunas variables del tandem.

Como los resultados de la tabla en Excel demostraron ser suficientemente cercanos a la realidad se establecieron variaciones en algunas de sus variables consideradas "primarias" para tener una idea de la influencia que ellas producen sobre la capacidad y el consumo de potencia. A continuación se muestran gráficamente estos resultados. La capacidad se ofrece en toneladas de caña/hora, la Potencia sumaria a consumir en el tandem, en kW, los consumo específicos en kW/tonelada de caña y kW/tonelada de fibra y la eficiencia en %. Para poder ajustar las escalas fue necesario dividir la potencia sumaria sobre 10 y multiplicar el índice de consumo por tonelada de caña por 10.

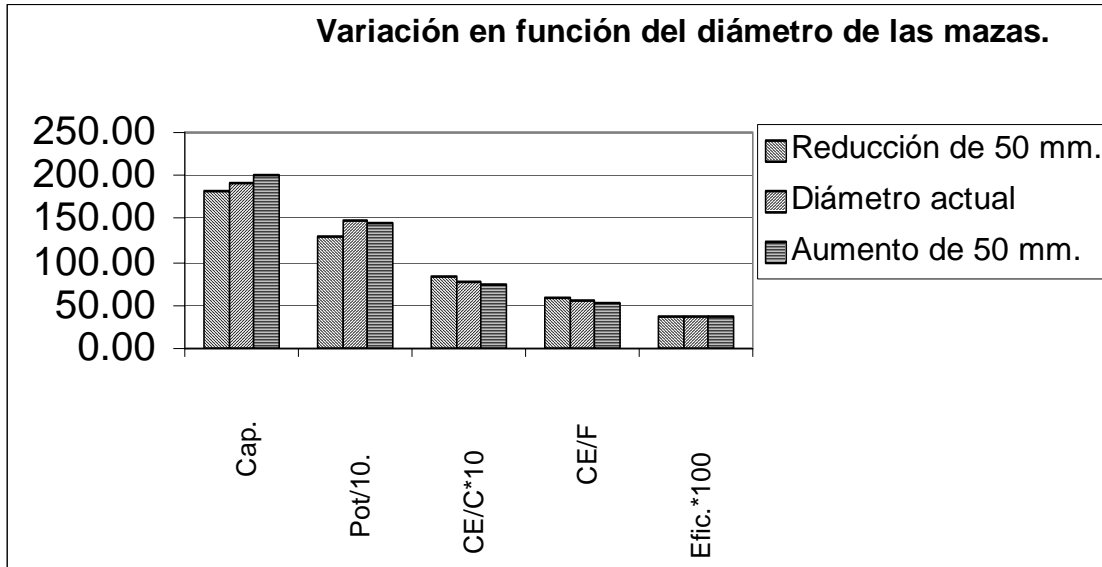


Figura 3.2 Variación de los parámetros en función del diámetro de las mazas.

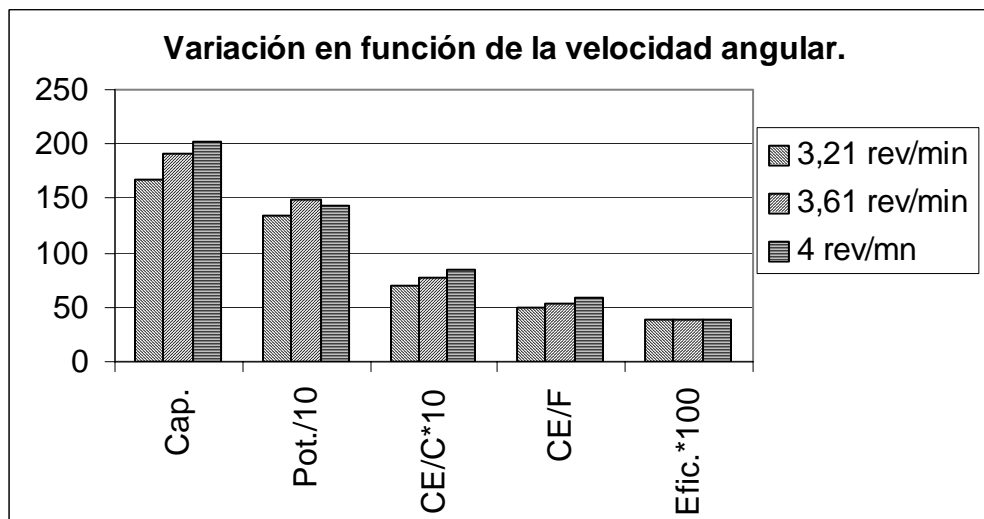


Figura3.3 Variación de los parámetros en función de la velocidad angular.

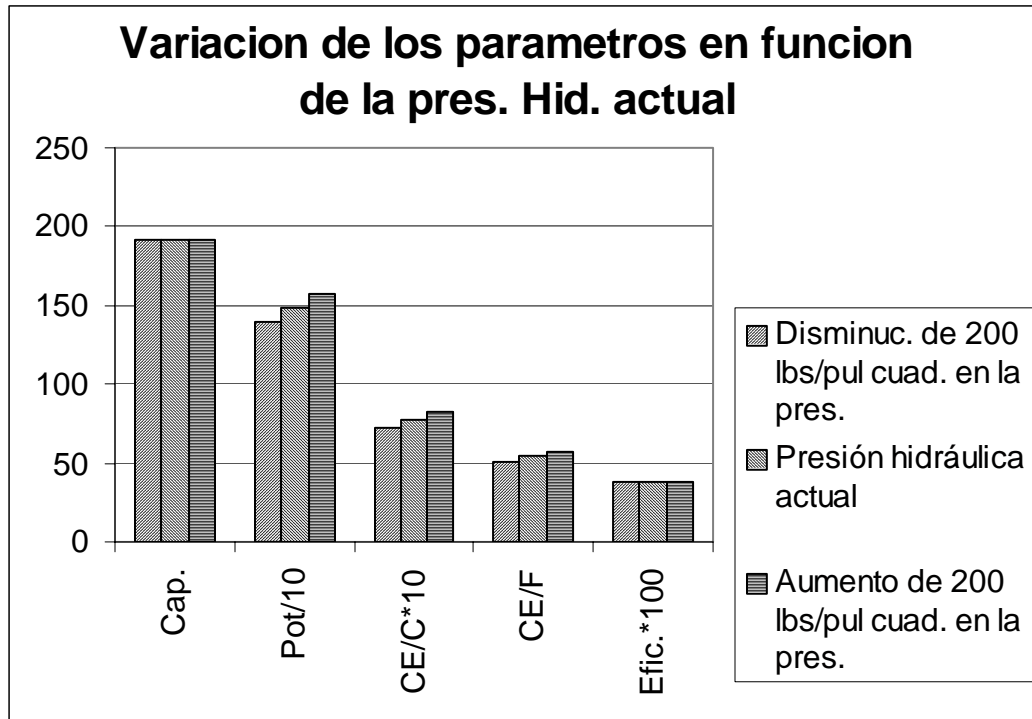


Figura 3.4 Variación de los parámetros en función de la presión hidráulica.

En estos gráficos se plotean los resultados de la influencia que producen las variaciones en el diámetro promedio de las mazas, la velocidad angular de los molinos y la presión hidráulica aplicada en los molinos sobre la capacidad, el consumo de potencia total así como los consumos específicos (índices de consumo) por tonelada métricas de caña procesada y de fibra molida así como la eficiencia.

De estos gráficos se desprende el porqué una tendencia general en el mundo en los últimos años ha sido el aumento en el diámetro de las mazas ya que con esta medida se aumenta sustancialmente la capacidad de molida sin un aumento considerable del consumo de potencia por lo que los índices de consumo disminuyen sustancialmente y se hace menos costosa la producción.

El aumento de la velocidad no es recomendable ya que con la misma aumenta el índice de consumo.

Los aumentos de las presiones hidráulicas traen consigo aumentos en el consumo de potencia además de aumentar el desgaste friccional y la tendencia a la rotura de los componentes del molino pero hasta ciertos valores producen mejoras en la extracción.

Conclusiones parciales:

- Según los resultados obtenidos de potencia consumida en el tandem por el Diagnóstico y los reales tomados se llegó a la conclusión de que las lecturas de consumo reales fueron mayores que las calculadas lo que se justifica por el hecho de que el tandem está moliendo por encima de su capacidad.. Esto se debe a que los valores de presiones hidráulicas reales observadas en todos los casos estuvieron por debajo de los previstos.
- Al comparar los dos métodos utilizados: el del Manual de Planta Moledora y el desarrollado por Pérez para calcular la capacidad del tandem del CAI y a su vez compararla con la real se llegó a la conclusión de el tandem está trabajando por encima de su capacidad potencial. Lo cual puede ser una de las causas de los elevados valores de pol en bagazo obtenidos en esta zafra ya que se le eliminó el segundo molino y no se hicieron ajustes en la capacidad de molida.
- El análisis de la influencia del diámetro de las mazas, las velocidades angulares y la presión hidráulica sobre la capacidad y el consumo de potencia evidencia que si se desea aumentar la capacidad de molida es necesario aumentar el diámetro de las mazas para que no aumente el consumo específico.

Conclusiones

CONCLUSIONES.

- Por sus características históricas y por su equipamiento es posible desarrollar este tipo de investigación en este central.
- La ausencia de un molino en el equipamiento sin un adecuado aumento en la preparación de la caña y dificultades en la disciplina tecnológica han originado un incremento de la pol en bagazo en el tandem que ha traído consigo pérdidas en el orden de los 227 502 USD.
- Aunque la experiencia con la caña energética no fue suficientemente extensa se nota que sus características para la generación de vapor son buenas, no así para la extracción.
- Por ambos métodos de diagnóstico de el Manual de Planta Moledora y el desarrollado por Pérez se llego a la conclusión de que el tandem está trabajando por encima de su capacidad potencial.
- Si se comparan los resultados de las lecturas reales y los obtenidos por el diagnóstico para el consumo de potencia en el tandem para los motores 1 y 3 el % de error entre ambos está en el orden del 10%. Que puede considerarse un valor adecuado.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Mejorar la superficie rellenada de las cuchillas.
2. Disminuir la altura del segundo juego de cuchillas sobre la estera.
3. Establecer el régimen de trabajo del tandem, discutirlo con los turnos de trabajo y controlarlo periódicamente.
4. Aumentar la presión en el tercer molino.
5. Establecer un régimen de trabajo para todas las variables operativas del tandem, discutirlo con el personal de cada turno y controlarlo periódicamente por los jefes de turno.
6. Montar la metodología de cálculo en la computadora y utilizarla como herramienta de trabajo en las discusiones técnicas que se establezcan en un futuro. Para ello es necesario que el personal técnico, la conozca también.
7. Mejorar progresivamente la instrumentación en el tandem para poder controlar adecuadamente las variables operativas.
8. Con ayuda de los sistemas de diagnóstico existentes verificar la capacidad potencial de molienda del tandem y discutirla con la delegación.
9. Continuar las evaluaciones con caña energética para su posible utilización como fuente de energía.

Bibliografía.

BIBLIOGRAFIA.

1. Abón, F.; “Uso de motores hidráulicos para el movimiento individual de cilindros en molinos cañeros. Sus resultados después de tres zafros de experiencia”, Revista de la ATAC, Cuba ,48 (5) 40-50, 1989.
2. Bower P. E. “Cane based power for export: overview on Hawaii experience” International Conference energy from sugar cane”, Hilo Hawaii, sep. 1991.

3. Cabello E., J.J.; “Cinemática, transmisión de la carga, lubricación y resistencia superficial de las coronas de molinos de caña de azúcar”, Tesis doctoral, Universidad Central, Villaclara, Cuba, 1999.
4. CENICAÑA, “Reducción de las pérdidas de sacarosa en el Ingenio San Carlos”, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, Revista trimestral, **19** (2) 1-4, Colombia, 1997.
5. Chinchilla Varona, M., “Importancia de la velocidad en la cantidad de agua manipulada y potencia consumida por un molino de caña”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1933.
6. Chinchilla Varona, M., “Distribución de la potencia moliendo caña”, Memorias del congreso de La ATAC, La Habana, 1938.
7. Cruz Rodríguez, F. “Cogeneración: alternativa del Siglo XXI”, Panorama Azucarero, Boletín de Información Científica y Técnica para los Cuadros de Dirección del Ministerio del Azúcar, Septiembre 1997.
8. De las Nieves R. M. “Cogeneración”, Ponencia presentada en la IV jornada Técnica, Universidad –Colegios Profesionales, Erpo Ingeniería, Albacete, España, 1992.
9. Díaz Compain [Díaz C.J., “El desgaste de las cuchillas de los molinos como indicación de su forma ideal”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1933.
10. Espinosa, R. et. al. “Sistemas de utilización del calor”, Editorial ENPES, La Habana, 1993.
11. Fernández, C.F.; Espinosa, A.A.; Mendoza, D.I., “Sistema automatizado para el trazado de molinos de caña”, Centro Azúcar, **25** (3) 67-72, Cuba, 1998.
12. Fernández, F., “Sistema automatizado para el trazado de molinos de caña”, tesis de doctorado, Universidad Central, Villa Clara, Cuba, 2001.
13. Gibbon M.; “CAD Trashplate design”, Proceeding of the Annual Congress, South African Sugar Technologists Association, No. 68, 143-145, Sudáfrica, 1994.
14. Hernández González, C. et al. “Energía de la biomasa”, Manuales de Energías renovables, No. 3, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 1996.
15. Herscovici S., “Caja de engranes de tipo planetario de alta potencia para reducir los costos de funcionamiento y mejorar la eficiencia de los molinos”, Revista International Sugar Journal.
16. Holland Group, “Proyecto de cogeneración de electricidad con biomasa cañera en la República de Cuba. Estudio de Prefactibilidad”, La Habana, AEC, 1996.
17. Horta Nogueira. L.A. et al. “Estudio alternativo de la caña de azúcar como recurso alimenticio y energético-un modelo integrado”, Núcleo de Estudios de Sistemas Térmicos. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Federal de Ingeniería de Itajubá, Itajubá - MG – Brasil, 24 de marzo del 2000.
18. <http://www.santiago.cu/epica/CALIDAD%20JUGO-STGO.html>
19. <http://www.coopevictoria.com/victoria/producto2.htm>
20. <http://www.ingeniopichichi.com/acerca.html>

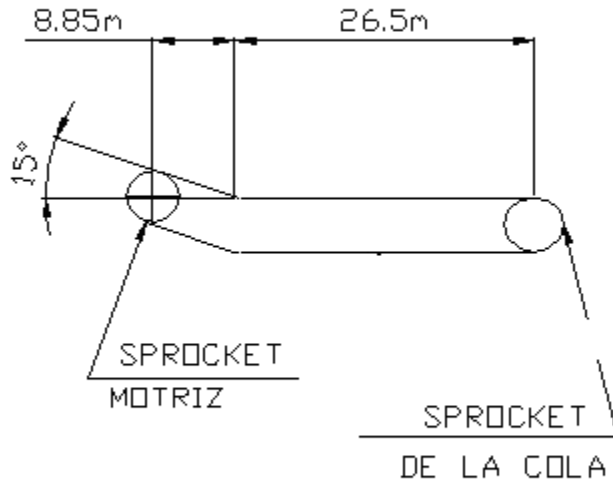
21. <http://www.sagarpa.gob.mx/Forma/sitios/infgral.htm>
22. <http://www.educar.org>
23. Hugot E. “ Handbook of Sugar Cane Engineering” . Editorial Elsevier . Ámsterdam, 1986.
24. Hugot E. “ Manual Para Ingenieros Azucareros”. Editorial Pueblo y Educación , La Habana, 1980.
25. Hugot, MINAZ, “Manual de operaciones de la planta moledora”, La Habana, 1996
26. Hugot, Editorial Elsevier.
27. Jenkin D.M. “Measurement of milling torque”. Factory Commission. XVIII Congress ISSCT, La Habana, Cuba , 1983.
28. Jenkin G.H. “Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña”.Editorial Viencia y Técnica , La Habana, 1971.
29. Joward P. J. “Cogeneration in the sugar cane industry”,Esivier soience publiabers,1995.
30. Kent, G.A., “Adequate Assessment of factory extraction performance”, Proceedings of the Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 407-412, Australia, 1998.
31. Kent, G.A., “A model to stimate milllin unit troughput”, Proceeding of the Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 457-460, Australia, 2001.
32. Kinoshita C. M. “Potencial for cane energy” International Coference energy from sugar cane”, hilo Hawai, sep. 1991.
33. Kinoshita, C.M. “Potential for Cane Energy”, International Conference on Energy from Sugarcane, Hilo, Hawaii, September 10-13, 1991.
34. Larson, Eric. D. “Summary Report on Visit To Cuba”, July 8, 1994.
35. Lebron, J.L., “Procedure to fit a fourth roll to the conventional (3 roll) mill”, Journal American Society of Sugar Cane Technologist, **12** 115-116, USA, 1992.
36. MACU. “Manual de Métodos Analíticos para el control unificado”. Instituto cubano azucarero, La Habana, Octubre 1996.
37. Mayo, J.R., “Notas sobre molidas de caña a altas velocidades”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1929.
38. Mayo, J.R., “Comparación del trabajo de los tandems de un ingenio con los de otro”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana 1929.
39. Mayo, J.R., “Discusión de la opinión del señor Tromp sobre la discusión del consumo de potencia en los molinos”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1937.
40. Minaz . “Criterios actuales de la Industria Azucarera Cubana”. La Habana, 1985.
41. Minaz.Manual de Planta Moledora . La Habana , 1988.

42. MINAZ, "Manual de operaciones de la planta moledora", La Habana, 1996.
43. Morrel I.F; "Tecnología azucarera" ,Editorial Pueblo y Educación ,1985.
44. Moya, R., J. L.; "Diseños de coronas de molinos de caña de azúcar", tesis doctoral, Universidad Central, Villaclara, Cuba, 1994.
45. Murry, C.R., "Low pressure compression characteristic of prepared cane: a review", Proceedings of the 1998, Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 413-420, Australia, 1998.
46. Negrín L.I., "Optimización de los diseños para las coronas de los molinos caña de azúcar", Tesis de doctorado, Universidad Central, Villa Clara, Cuba, 2000.
47. Payne, John H. "Cogeneration in the Sugar Cane Industry", Nueva York, 1991.
48. Pérez E. "Folleto Guía para el Curso de Maquinaria Azucarera".UCLV, 1988
49. Pérez C., E.E.; "Estudio del consumo de potencia en los molinos de caña", Tesis de Maestría, Universidad Central, Villaclara, Cuba, 1996
50. Pérez C., E.E.; "Determinación de valores de la potencia en molinos de caña de azúcar", COMEC 2000, Universidad Central, Villaclara, Cuba, 2000.
51. Pérez E. et al, "Determinación del consumo de potencia en un molino a nivel Planta Piloto" , 48 Congreso de la ATAC, La Habana, Cuba, noviembre de 2002
52. Ramanriskina, J.; Satyanarayana,J; Rao,R.V., "Self setting mill and continuous pan for sugar factory", in Modernization of Indian sugar industry, 135-138, New Delhi, India, 1990.
53. Reyes C. R " Propuesta del Equipamiento Necesario para la Medición de la Potencia en la Planta Piloto". Trabajo de Diploma , UCLV 1999
54. Riviere M. P. "Cogeneration in Reunion Island", President Quarter-Francois group of companies, 1992.
55. Scharnberg, J.B., "Problemas sobre molienda y capacidad eficiente", Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1927.
56. Shirakov, V.P.; " Manual de Hilandería" , pag 392-394, Moscú, 1985.
57. Torres J.,Fiandor H., Gómez W."Proposición para la remodelación de calderas de los centrales cubanos",MINAZ,Enero 1995.
58. Tromp L.A., "Machinery and equipment of the cane sugar extraction", Editorial Idol Lane, Londres, 1956.
59. Unión Nacional Eléctrica. "Programa de desarrollo del sector eléctrico", Folleto, Habana ,Cuba ,sep.1995.
60. Varona, M., " Importancia de la velocidad en la cantidad de agua manipulada y potencia consumida por un molino de caña" Memorias del Congreso de la A.T.A.C. La Habana, 1950.
61. Vegetarian Resource Group, "El azúcar y otros edulcorantes en los Estados Unidos", Vegetarian Journal. Mar/Abr 97.
62. Weil R., "Perfeccionamientos realizados en los equipos de molienda", Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1929.

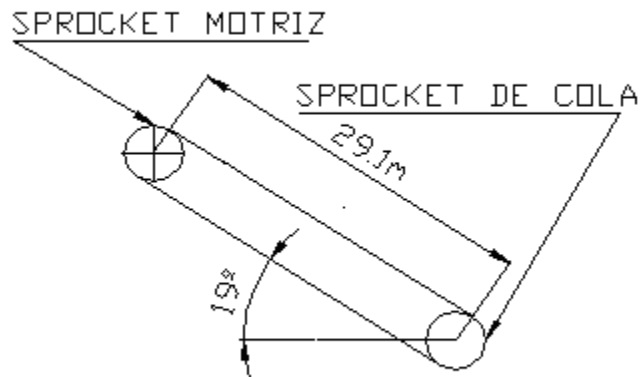
63. Winrock International Institute, "Agricultural Developments Energy from Sugar Cane Cogeneration in El Salvador", USA, 1994.

Anexos

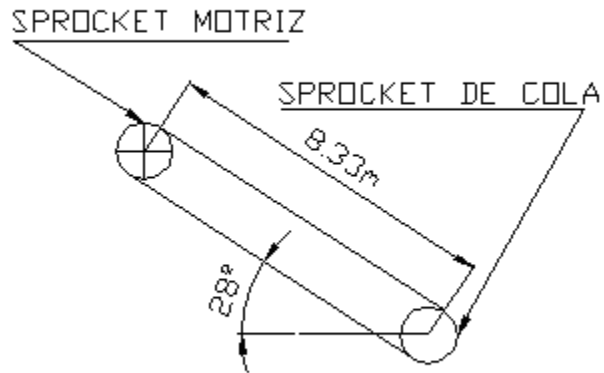
Anexo 1: Traza del transportador # 1 de Tablillas.



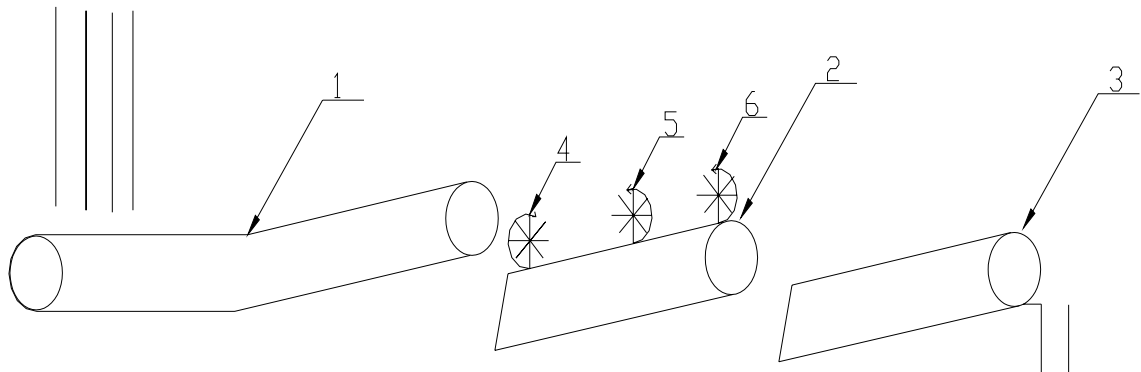
Anexo 2: Traza del transportador # 2 de Tablillas.



Anexo 3: Traza del transportador # 3 de Tablillas.

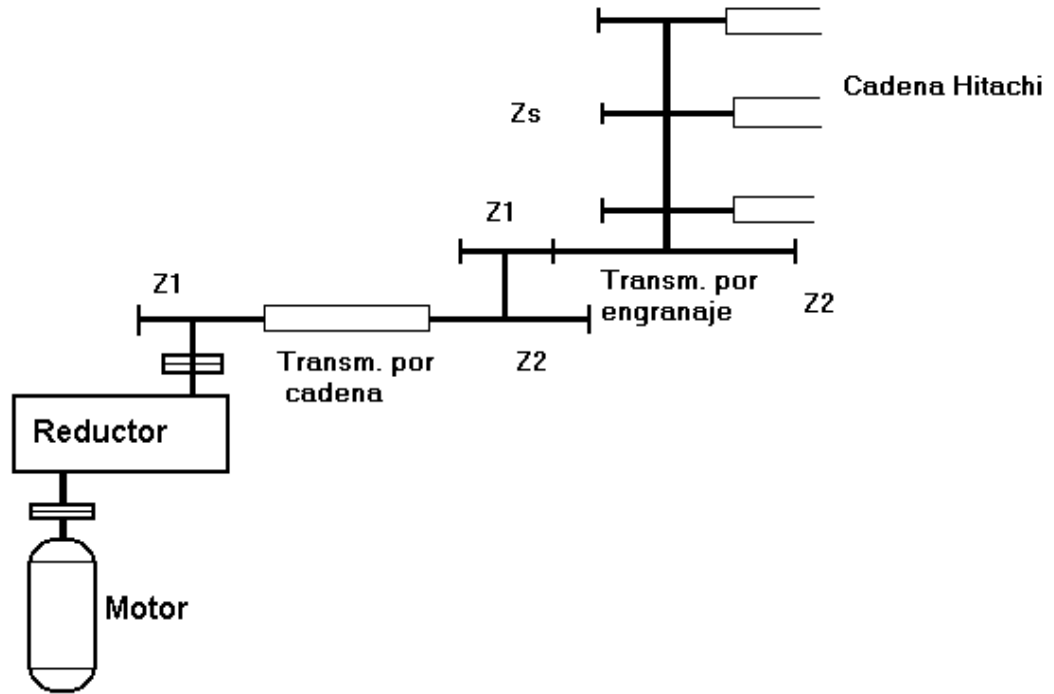


Anexo 4: Sistema de transmisión del transportador # 1 de tablillas.

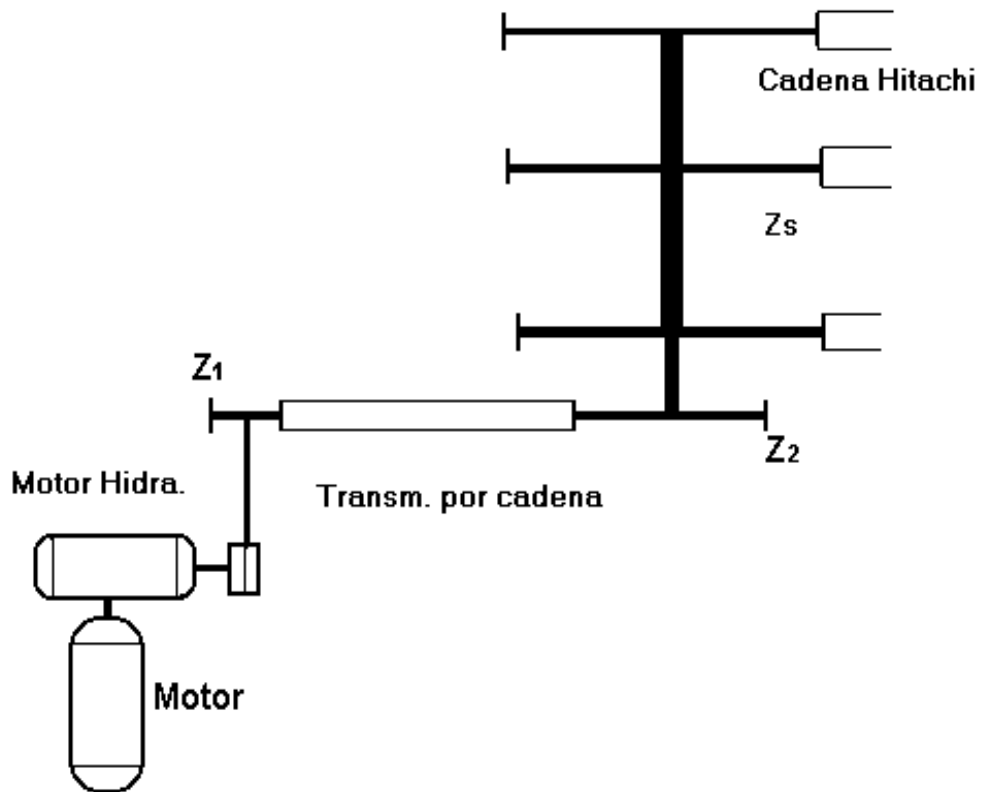


- 1-Estera número 1.
- 2-Estera número 2.
- 3-Estera número 3.
- 4-Nivelador.
- 5-Cuchilla número 1.
- 6- Cuchilla número 2

Anexo5: Sistema de transmisión del transportador # 1 de tablillas.

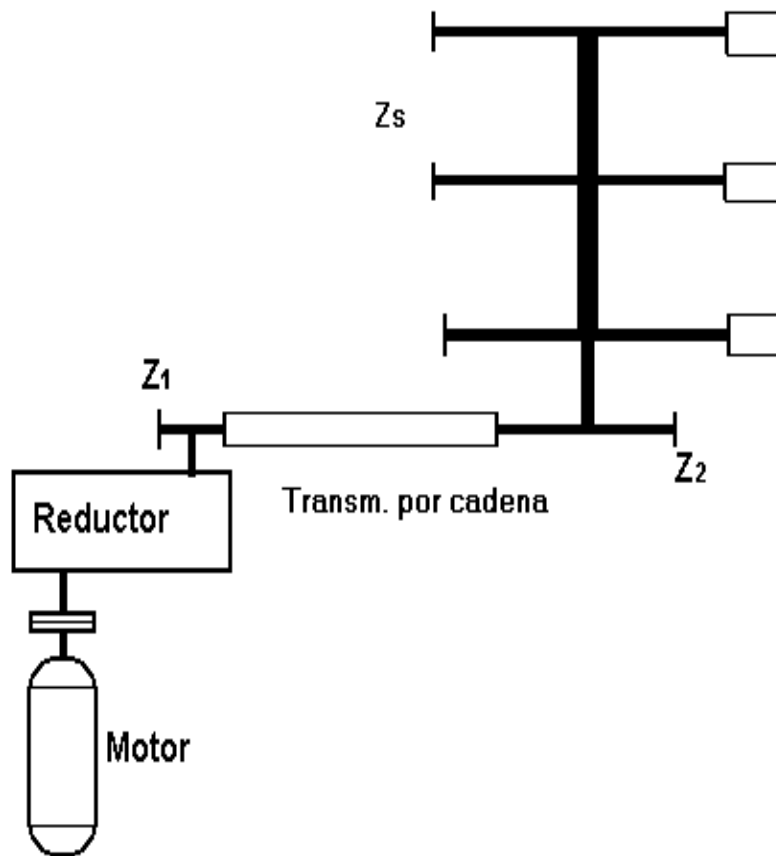


Anexo6: Sistema de transmisión del transportador # 2 de tablillas.

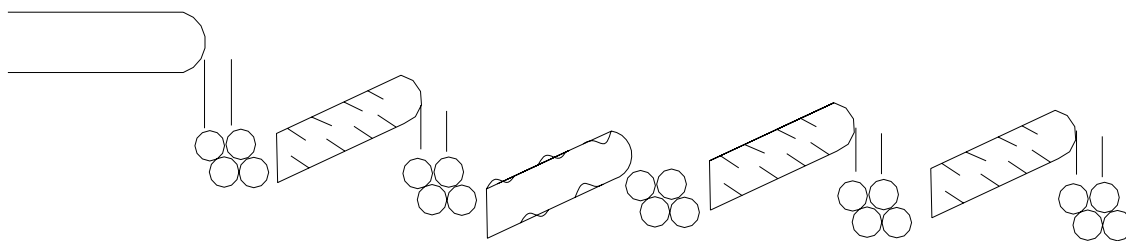


Anexo 7: Sistema de transmisión de los transportadores # 3 .

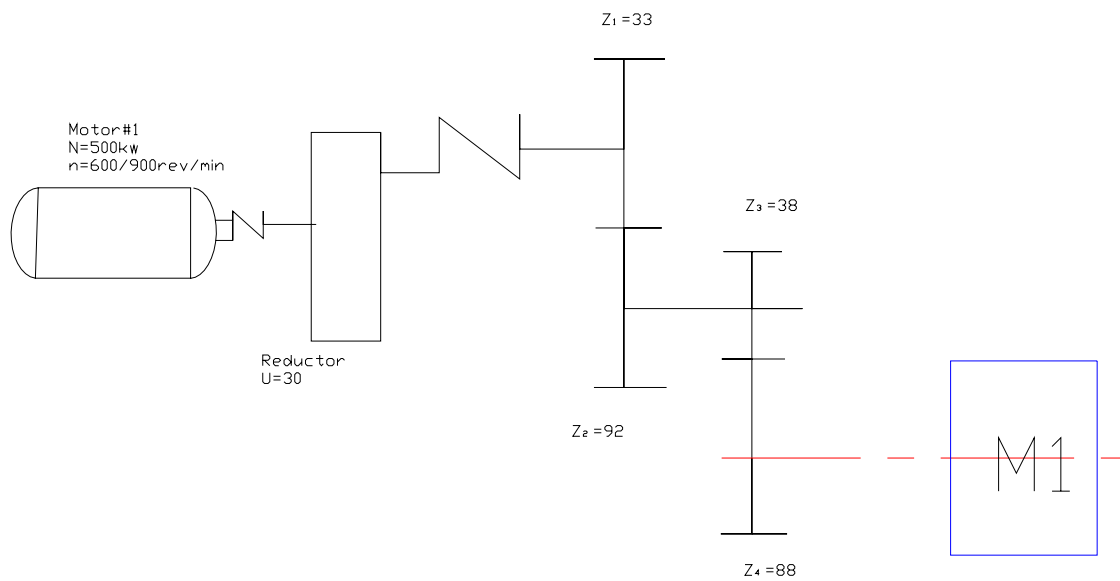
- La cadena que mueve el sproket motriz en el transportador #3 es Hitachi .



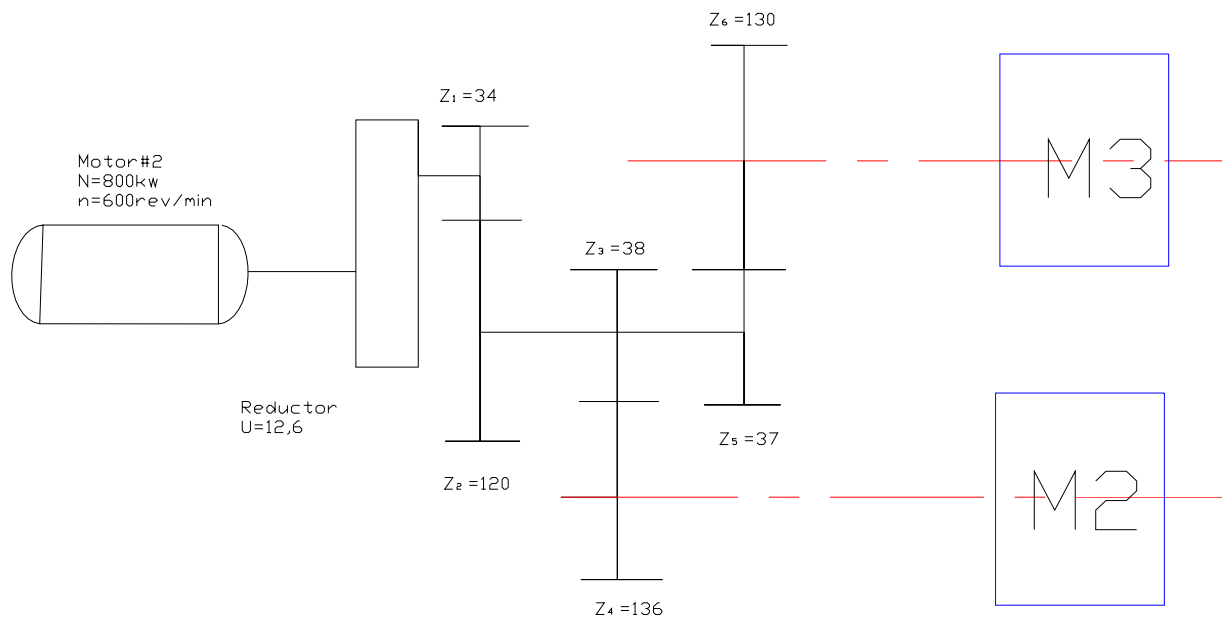
Anexo 8 Vistas lateral del tandem



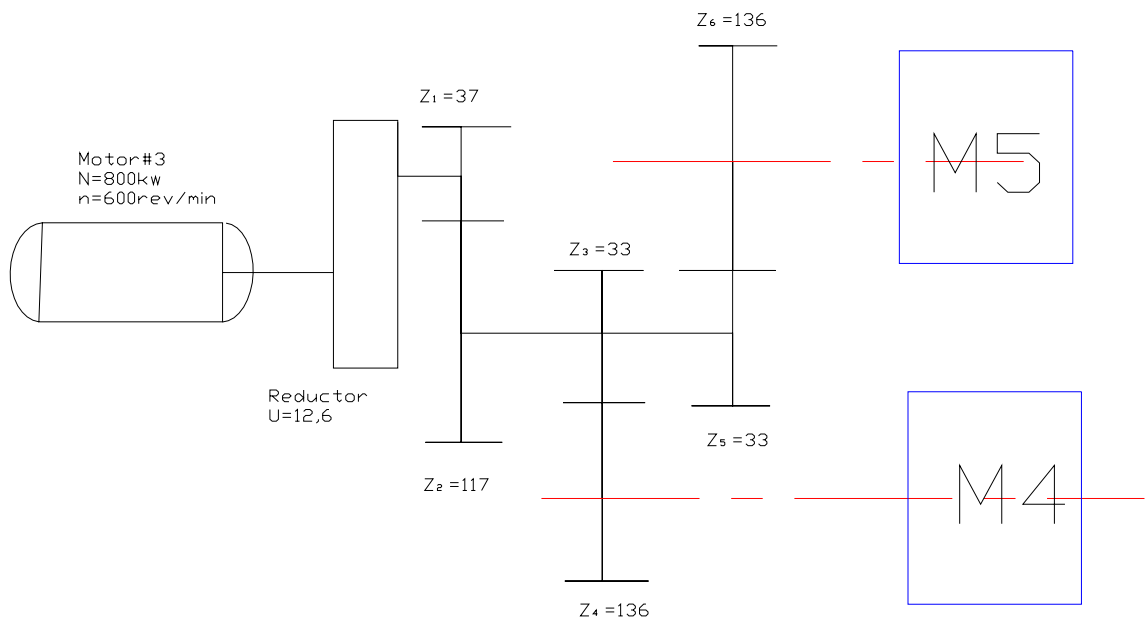
Anexo 9 Esquema de transmisión del molino 1



Anexo 10 Esquema de transmisión del molinos 2 y 3.



Anexo 11 Esquema de transmisión del molinos 4 y 5.



Anexo 12 Esquema del proceso de maceración e imbibición.

