

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIMI**  
Facultad de  
Ingeniería Mecánica  
e Industrial

Departamento de Ingeniería  
Mecánica

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título del trabajo:** Análisis del montaje de dos unidades motrices en el  
tándem del central Uruguay

**Autores del trabajo:** Dayrón Caleyó López

**Tutor del trabajo:** Dr. Eusebio Enrique Pérez Castellanos

**Cotutor:** Ing. Yoan García Castillo

Santa Clara, Curso 2017-2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

# *Pensamiento*

*“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad”.*

*Víctor Hugo*

# *Dedicatoria*

*A las personas que siempre han estado conmigo; mi familia. Los únicos por los cuales, en su búsqueda, cruzaría los mares; por todo el apoyo que siempre me han dado; por correr detrás de mí y de mis cosas; porque son la fuerza que me impulsa cada día, y por siempre tener absoluta confianza en mí; los amo infinitamente.*

# Agradecimientos

*A todas aquellas personas que me han ayudado a llegar donde he llegado, que han estado conmigo en momentos determinados, por su apoyo y comprensión:*

*¡Muchas Gracias!, especialmente...*

**A mi mamita linda:** *Por tener el corazón más grande del mundo, en el cual siempre he encontrado perdón; por ser infinitamente especial; por enseñarme que todo es posible siempre que se lucha a diario; por educarme sabiendo que quien entrega y siembra todos los días un poco de amor, tiene el privilegio de ver sus frutos. Gracias por todo lo bueno que has hecho por mí, por tu apoyo incondicional, por ser la mejor mamá del mundo. Lo eres todo en mi vida, te amo.*

**A mi papa ejemplar Ulises:** *Por todas tus enseñanzas y tu buen ejemplo; por mostrarme el camino correcto para corregir mis errores sabiamente; porque siempre has estado ahí cuando más lo necesito. Nunca me cansaré de decirte cuanto te quiero y lo orgulloso que me siento de ti. Gracias por todo lo bueno que has hecho por mí, por ser el mejor papá del mundo. Eres todo para mí, te amo.*

**A mi magnífico tutor Eusebio:** *Por tus ánimos cuando más lo necesitaba; por todas tus atenciones; por siempre tener mucho tiempo para escuchar. Gracias por hacerme sentir como de tu familia, no me alcanza la vida para agradecerte.*

**A mi cotutor Yoan:** *Por su dedicación, paciencia y preocupación constante; por no escatimar sus horas de trabajo o descanso en el asesoramiento de mi trabajo; por su incondicional apoyo y ayuda en todo momento.*

**A mi novia:** *Por siempre estar a mi lado y darme su apoyo incondicional; por guiarme hacia el buen ejemplo y siempre hacerme ver las cosas buenas y malas desde otro punto de vista.*

**A mis profesores:** *Por sus formas de enseñar, todas diferentes y características, que me incentivaron en muchos sentidos a seguir adelante; por formarme como un profesional de bien; sin ustedes esto no hubiera sido posible.*

**A mis amigos:** *Los de mi niñez, adolescencia y madurez; los que ya no veo con frecuencia y los que veo día a día, los que han estado en los momentos difíciles y a los que siempre comparten conmigo una sonrisa y de los que aprendí grandes lecciones; por escuchar y llenarme con sus buenos consejos; por demostrarme que la distancia no hará que nuestra amistad se pierda; por convertirse en unos hermanos más para mí. Ustedes son los mejores.*

**A mis compañeros de grupo:** *Por compartir juntos cinco años de pura alegrías y vicisitudes apoyándonos en todo momento, nunca los olvidaré, ya forman parte de mi vida.*

*A todos los que no confiaron en mí.*

*A quienes siempre llevo conmigo y cada día les agradezco lo que soy, al resto de mi familia y a todos los que con su ayuda hicieron posible la realización de este sueño.*

*¡Muchas Gracias!*

# *Resumen*

En el presente trabajo se desarrolla un análisis del montaje de dos unidades motrices en el tándem del central Uruguay. En este caso se trata de los molinos 1 y 6. Esta inversión se llevó a cabo con vistas a aumentar la capacidad de molienda del tándem desde 9 200t/día hasta 13 000 t/día. Se analizan las posibilidades de alcanzar estas capacidades y consumo de potencia que debe producirse en su funcionamiento.

# *Abstract*

In the present work an analysis of the assembly of two motor units in the tándem of the central Uruguay is developed. In this case it is mills 1 and 6. This investment is being carried out with a view to increasing the tándem milling capacity from 9 200 t/day to 13000 t/day. The possibilities of reaching these capacities and the energy consumption that must take place in its operation are analyzed.

## TABLA DE CONTENIDOS

Resumen.....	vii
Introducción.....	1
Estructura del trabajo .....	6
<b>CAPÍTULO 1. Reductores planetarios. Variadores de frecuencia. Diagnóstico del sistema.</b>	<b>7</b>
1.1. Reductores de velocidad. ....	7
1.1.1 Tipo de reductores de velocidad. ....	7
1.2. Clasificación por tipo de engranajes. ....	7
1.2.1 Reductores de velocidad de Sin-fin Corona. ....	7
1.2.2 Reductores de velocidad de engranajes. ....	8
1.3. Reductores Cicloidales. ....	8
1.4. Reductores planetarios. ....	8
1.4.1 Reductores de velocidad planetarios. ....	9
1.5. Clasificación por disposición de los ejes lento y rápido. ....	10
1.6. Principales ventajas de un reductor planetario. ....	11
1.7. Accionamientos con variadores de frecuencia. ....	11
1.7.1 Principio de funcionamiento.....	12
1.8. Variadores de velocidad. ....	13
1.8.1 Variadores para motores de CA.....	14
1.9. Diagnóstico del sistema:.....	15
1.10. Capacidad de molida. ....	15
1.11. Consumo de potencia.....	16
Conclusiones parciales. ....	18
<b>CAPÍTULO 2. Caracterización del equipamiento. Método empleado para los cálculos.</b>	<b>19</b>
2.1. Caracterización del área de manipulación, preparación de caña y planta moledora en el Central Azucarero Uruguay en la zafra pasada. ....	19
2.1.1 Manipulación.....	19
2.1.2 Preparación.....	20
2.1.3 Planta moledora. ....	21

2.2. Modificaciones.....	22
2.3. Expresión final de la capacidad de molida para las condiciones de este ingenio.....	25
2.4. Análisis de las expresiones obtenidas a la luz de la aplicación de los cálculos de capacidad y ajustes (setting), factor de reabsorción, presiones y potencia recomendados en la literatura.....	26
2.4.1 Velocidad lineal de las mazas.....	26
2.4.2 Capacidad de molida de caña.....	27
2.4.3 Ajustes o setting.....	28
2.4.4 Factor de reabsorción.....	32
2.4.5 Fuerzas hidráulicas totales aplicadas sobre el colchón.....	33
2.4.6 Potencia de los molinos (kW).....	34
2.5. Descripción del Excel.....	35
Conclusiones parciales.....	40
CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados obtenidos. Comparación con el diagnóstico.....	41
Conclusiones parciales.....	46
CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRÁFÍAS REFERENCIADAS.....	49
ANEXOS.....	51

## **Introducción**

La industria azucarera cubana se enfrenta en la actualidad a dos situaciones importantes:

- Necesidad de crecimiento de la producción de azúcar en el país, para satisfacer el consumo interno y aumentar las exportaciones del dulce.
- Necesidad de emplear un grupo de fábricas de azúcar como centrales termoeléctricas a base de biomasa cañera.

En cuanto al primer aspecto se requieren molidas altas y estables en aquellos centrales que procesen más cantidad de caña para pasar de los bajos niveles actuales de producción a valores más elevados.

Para ello será necesario que se produzcan inversiones importantes para garantizar las cantidades necesarias de materia prima que se requieren en el proceso y que se modernicen algunos de los elementos que forman el equipamiento de las fábricas. En ello juegan un papel importante los molinos.

En el cumplimiento de estos objetivos posee una gran influencia la intervención de inversionistas extranjeros.

El segundo aspecto se ve reflejado con claridad en los planteamientos siguientes, tomados del periódico Granma y mediante información ofrecida por dirigentes del grupo AZCUBA. **(Granma, 29 de mayo de 2017)**

La política para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía, aprobada en el 2014, contiene las acciones para el incremento de la eficiencia energética y la instalación de 2 mil 144 MW hacia el 2030, a partir de tecnologías limpias, para alcanzar hasta el 24 % de participación en la generación eléctrica. **(Granma, 29 de mayo de 2017)**

Con esa potencia instalada podrán producirse 7 mil 316 GWh en una zafra, sustituyendo un millón 75 mil toneladas de combustible al año, que implicará una considerable reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y con ello de la carga contaminante al medio ambiente.

Del total propuesto, se encuentran en operaciones una parte, otros están en diferentes fases de su construcción, mientras con el resto se realizan acciones para

la preparación de su ejecución, la gestión de créditos bancarios, la negociación con inversores extranjeros y otros quedan pendientes de salir al mercado.

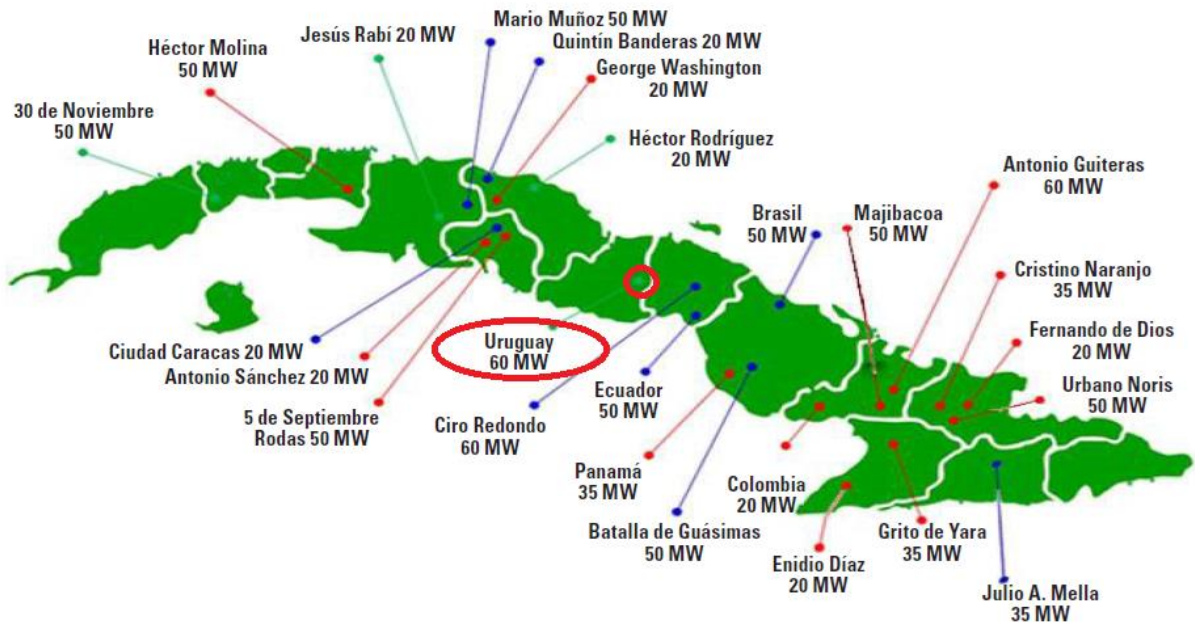
La producción de electricidad con fuentes renovables de energía (FRE) es baja, pues solo representa el 4,5 % de la generación del país; el aporte más elevado se logra con biomasa cañera, la hidroenergía, y las que proceden de los parques solares fotovoltaicos y de los eólicos. **(Granma, 29 de mayo de 2017)**

Ese total equivale a 18 días del consumo de electricidad del país, significa la sustitución de 188 mil toneladas de combustible fósil, por lo que se dejan de emitir a la atmósfera 638 mil toneladas de CO<sub>2</sub>. **(Granma, 29 de mayo de 2017)**

La diversidad de FRE que se emplearán para aumentar la generación eléctrica contempla la construcción de 25 bioeléctricas en centrales azucareros, 14 parques eólicos, así como la instalación de 700 MW en parques solares fotovoltaicos y de otros 56 MW en las 74 pequeñas centrales hidroeléctricas que se construirán. No es despreciable el aporte del biogás que se logra con los residuos orgánicos de la producción animal; en el país funcionan seis plantas industriales que generan electricidad y otras 3 mil 200 pequeñas. **(Granma, 29 de mayo de 2017)**

La biomasa —fundamentalmente la proveniente de la caña de azúcar—, el sol, el viento y la energía hidráulica son las fuentes a las cuales se les puede apostar con mayor certeza para la diversificación de la matriz energética.

Al igual que otros países, alcanzar en Cuba un 100 % de autoabastecimiento energético con fuentes renovables de energía es un reto para esta generación.



**Figura 1.1:** Plan de desarrollo de la generación eléctrica con biomasa cañera en Cuba.

La biomasa cañera proveniente de la producción de azúcar está compuesta por el bagazo y la paja de caña.

Con una potencia instalada de 470 MW en 57 centrales, que generan un potencial de 38 millones de toneladas de caña a moler en cada zafra, la industria azucarera presenta una baja producción energética debido a la obsolescencia tecnológica del proceso industrial y la utilización de calderas de vapor de baja presión, que alcanzan solamente 37,6 kWh/t de caña molida.

El programa hasta el 2030 para la construcción de bioeléctricas en los centrales azucareros elevará la potencia en otros 870 MW, con una generación de 4 mil 300 GWh/año, la sustitución de 960 mil toneladas de combustible al año, lo que evitará la emisión de 3 millones 65 mil toneladas de CO<sub>2</sub> anuales. **(Curbelo, 2003)**

No hay duda de que la estrategia energética puesta en marcha se dirige hacia una energía limpia, segura y sustentable, o lo que es lo mismo, hacia las fuentes renovables de energía. En ese sentido, constituye una necesidad alentar su aprovechamiento en aras de enfrentar la carencia de combustibles fósiles y sustituir el petróleo importado que, asimismo, está expuesto a la inestabilidad de los precios en el mercado internacional. **(Miño, 2003)**

Resulta un imperativo, además, que el medio ambiente no puede continuar deteriorándose por parte del hombre con el uso del petróleo en todas sus aplicaciones. No hay dudas de que la meta de 100 % de la generación de electricidad a partir de las fuentes renovables de energía es difícil, pero alcanzable. Dos datos de lo que se logra actualmente con el empleo de las fuentes renovables de energía (FRE), son suficientes para respaldar la política aprobada en el país: los 755 GWh aportados durante el 2016 sustituyen la importación de 188 mil toneladas de combustible, y la no emisión a la atmósfera de 638 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, minimizando el impacto de la contaminación ambiental. **(Miño, 2016)**

El uso de las fuentes renovables de energía ha recibido un notable respaldo de la comunidad internacional con el Acuerdo de París, suscrito en el 2015, por el que casi 200 países se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para tratar de que el aumento de la temperatura quede por debajo de 2° C, límite para que los efectos del cambio climático no sean catastróficos.

Tampoco se puede desdeñar el efecto económico que traerá la transición hacia un sistema basado en tecnologías alternativas. **(Miño, 2015)**

Cuba alcanza la mayor generación mediante la biomasa cañera, un aporte que deberá aumentar significativamente a partir de la puesta en marcha de modernas centrales eléctricas anexas a ingenios azucareros, y la aplicación de tecnologías más eficientes para disminuir el consumo energético en el proceso fabril e incrementar la generación en ellos. Durante el período de zafra, el cual debe rebasar los 120 días en el país, las fábricas de azúcar se autoabastecen de electricidad y entregan sus excedentes al Sistema Eléctrico. **(Miño, 2003)**

Volviendo al primer aspecto, relacionado con la necesidad de crecimiento de la producción de azúcar en el país, para satisfacer el consumo interno y aumentar las exportaciones del dulce, se presenta la necesidad de modernizar algunos de los tandems de molinos y en particular las unidades motrices.

Uno de los centrales objeto de estas modificaciones es el central Uruguay, en el cual se deseaba ampliar la capacidad de molienda de unas 9 200 t/día hasta 13 000 t/día. Aparte de aumentar el abastecimiento de caña se requiere que el tandem sea

capaz de procesar una mayor cantidad de materia prima y con mayor eficiencia que la actual.

Para ello se sustituyeron dos motores y reductores Skoda (en el 1ero y 6to Molino) por motores españoles con una potencia instalada de 1000 kW cada uno, con reductores planetarios y con alimentación de corriente a través de un variador de frecuencia.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone como:

- **Problema científico:**

No se conocen con suficiente profundidad todos los aspectos que pueden resultar del montaje de las dos nuevas unidades motrices.

- **Hipótesis:**

Si se analizan con profundidad los elementos que intervienen en la puesta en marcha de las dos unidades motrices en el tándem de la UEB Uruguay podrán desarrollarse recomendaciones para mejorar este proceso de inversión.

- **Objetivo general:**

Analizar desde el punto de vista tecnológico y energético el montaje de dos nuevas unidades motrices en el tándem del central Uruguay.

- **Objetivos específicos:**

1. Analizar la tendencia de las modificaciones en los ingenios de Cuba para cumplir con la modificación de la matriz energética prevista en el país hasta el año 2030.
2. Comparar las características de los componentes del tándem del central Uruguay hasta la zafra pasada y los que se montaron en esta zafra.
3. Comparar los valores de las variables tecnológicas y energéticas obtenidos hasta la zafra pasada con los que se lograron en esta zafra.

**Estructura del trabajo**

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: Introducción, capítulo 1, capítulo 2, capítulo 3, conclusiones y anexos. En la introducción se realiza una detallada explicación de la necesidad que tiene el país de incrementar la exportación del dulce de caña y la necesidad de usar los ingenios como centrales termoeléctricas a partir de fuentes renovables de energía, en este caso la biomasa cañera; pero también el plan existente en Cuba para lograr lo anteriormente planteado. En el capítulo 1 luego de una amplia búsqueda bibliográfica se trata sobre los conceptos teóricos de los reductores planetarios y variadores de frecuencia, así como sus tipos, características y ventajas. También se dan a conocer las dos ecuaciones principales con las que se va a trabajar en próximos capítulos que son la de consumo de potencia y capacidad de molienda. En el capítulo 2 se realiza una caracterización del área de manipulación, preparación de caña y planta moledora en el Central Azucarero Uruguay en la zafra pasada y se dan a conocer las modificaciones en el tándem para esta zafra. Por otra parte, se hace un análisis de las expresiones obtenidas a la luz de la aplicación de los cálculos de capacidad y setting, factor de reabsorción, presiones y potencia recomendados en la literatura y se explica cada paso realizado en el Excel. En el capítulo 3 después de realizar los cálculos anteriormente expuestos y de ver los resultados obtenidos en el Excel y los recomendados por la literatura y por el Manual de planta moledora se comparan ambos resultados.

Por último, se señalan las conclusiones a que se arribó en el desarrollo del trabajo y se establecen las recomendaciones pertinentes.

---

**CAPÍTULO 1.    Reductores planetarios. Variadores de frecuencia.  
                  Diagnóstico del sistema.**

**1.1. Reductores de velocidad.**

Toda máquina cuyo movimiento sea generado por un motor (ya sea eléctrico, de explosión u otro) necesita que la velocidad de dicho motor se adapte a la velocidad necesaria para el buen funcionamiento de la máquina. Además de esta adaptación de velocidad, se deben contemplar otros factores como la potencia mecánica a transmitir, el torque, la potencia térmica, rendimientos mecánicos (estáticos y dinámicos). **(Wikipedia, 2017)**

Esta adaptación se realiza generalmente con uno o varios pares de engranajes que adaptan la velocidad y potencia mecánica montados en un cuerpo compacto denominado reductor de velocidad, aunque en algunos países hispano-parlantes también se le denomina caja reductora.

**1.1.1 Tipo de reductores de velocidad.**

Los reductores de velocidad se suelen clasificar de un modo bastante anárquico, solapándose en algunos casos las definiciones de modo intrínseco y en otros casos hay que usar diversas clasificaciones para definirlos. **(Cotransa, 1996)**

**1.2. Clasificación por tipo de engranajes.**

Los reductores se pueden clasificar por la tipología de sus engranajes, las clasificaciones más usuales son: Sin-fin-Corona, engranajes y planetarios. **(Wikipedia, 2017)**

**1.2.1 Reductores de velocidad de Sin-fin Corona.**

Es quizás el tipo de reductor de velocidad más sencillo, se compone de una corona dentada, normalmente de bronce en cuyo centro se ha embutido un eje de acero (eje lento), esta corona está en contacto permanente con un husillo de acero en forma de tornillo sin-fin. Una vuelta del tornillo sin-fin provoca el avance de un diente

---

de la corona y en consecuencia la reducción de velocidad. La reducción de velocidad de una corona sin-fin se calcula como el cociente del número de dientes de la corona por el número de entradas del tornillo sin-fin.

### **1.2.2 Reductores de velocidad de engranajes.**

Los reductores de engranajes son aquellos en que toda la transmisión mecánica se realiza por pares de engranajes de cualquier tipo excepto los basados en tornillo sin fin. Sus ventajas son el mayor rendimiento energético, menor mantenimiento y menor tamaño.

### **1.3. Reductores Cicloidales.**

El sistema de reducción de velocidad cicloidal se basa en un principio ingeniosamente simple.

El reductor de velocidad sólo tiene tres partes móviles:

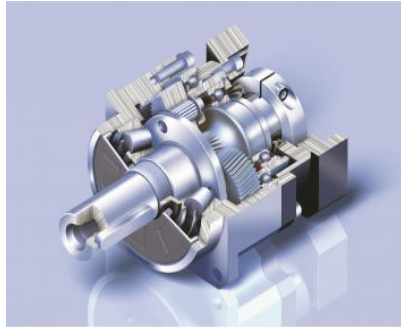
- El eje de entrada de alta velocidad con una leva excéntrica integral y un conjunto de cojinete de rodillo
- El disco cicloidal y el conjunto del eje de salida de baja velocidad.

La acción de rodamiento progresiva y pareja de los discos cicloidales eliminan la fricción y los puntos de presión de los engranajes convencionales. Todos los componentes que transmiten el par de torsión de cicloidal ruedan y están dispuestos en forma simétrica alrededor del eje para una operación equilibrada. **(Cotransa, 1996)**

### **1.4. Reductores planetarios.**

El reductor planetario está compuesto por tres elementos: un engranaje central y múltiples engranajes denominados satélites o planetas situados alrededor del eje central (de aquí le denominación de reductor planetario) y una corona interna.

El eje de entrada se encuentra conectado con el engranaje central, el cual transmite movimiento rotacional a los engranajes planetarios, estos, a la vez rotan sobre la corona interna del reductor, transmitiendo movimiento al eje de salida del reductor. Los reductores planetarios pueden ser de una o dos etapas con relaciones de transmisión desde 1:3 a 1:200. (Figura 1.1)



**Figura 1.1:** Vista interior de un reductor planetario.

#### **1.4.1 Reductores de velocidad planetarios.**

Son reductores de engranaje con la particularidad de que no están compuestos de pares, sino de una disposición algo distinta; y sirven para diferentes tipos de variaciones de velocidad. **(Cotransa, 1996)**

Hay dos tipos de engranajes planetarios. Un sistema tiene el engranaje principal (sol), y una corona interna. El piñón está unido al eje de lo que desea mover y existen una serie de piñones montados en la estructura. Los piñones planetarios giran en torno al principal fijo, en la misma dirección, pero a una velocidad reducida. Los reductores de velocidad de engranajes planetarios, interiores o anulares son variaciones del engranaje recto en los que los dientes están tallados en la parte interior de un anillo o de una rueda con reborde, en vez de en el exterior. Los engranajes interiores suelen ser impulsados por un piñón, (también llamado piñón sol, que es un engranaje pequeño con pocos dientes). Este tipo de engrane mantiene el sentido de la velocidad angular. El tallado de estos engranajes se realiza mediante talladoras mortajadoras de generación. **(Herscovici, 1996)**

*Diagnóstico del sistema.*

---

La eficiencia de este sistema de reductores planetarios puede tomarse como  $0.98^{(\#etapas)}$ ; es decir si tiene 5 etapas de reducción la eficiencia de este reductor sería de  $0.98^5$  lo que es igual a 0,904 o 90,4%.

Debido a que tienen más dientes en contacto que los otros tipos de reductores, son capaces de transferir / soportar más torque; por lo que su uso en la industria cada vez es más difundido. Ya que generalmente un reductor convencional de flechas paralelas en aplicaciones de alto torque debe recurrir a arreglos de transmisión por cadenas lo cual no solo requiere de más tamaño, sino que produce más ruido.

**(Herscovici, 1996)**

La selección de reductores planetarios se hace como la de cualquier reductor, en función del torque en Newton - metro.

Como cualquier reductor, estos tienen engranajes y rodamientos y en los engranajes también aparecen la fricción y agotamiento de los dientes.

Debido a que los fabricantes utilizan diferentes formas de presentación del tiempo de operación para sus engranajes y del torque máximo que soportan, la ISO tiene estándares para regular esto: **(Wikipedia, 2017)**

ISO 6636 para los engranajes,

ISO 281 para los rodamientos

UNI 7670 para los ejes.

De esta forma se pueden comparar realmente las especificaciones técnicas de los reductores y se puede proyectar un tiempo de operación antes del fallo de cualquiera de los componentes principales del reductor, ya sea planetario de engranaje exterior.

**1.5. Clasificación por disposición de los ejes lento y rápido.**

Los reductores se pueden clasificar por la posición relativa del eje lento del reductor con respecto al eje rápido del mismo, las clasificaciones más usuales son; paralelos, ortogonales y coaxiales. **(Wikipedia, 2017)**

---

### **1.6. Principales ventajas de un reductor planetario.**

- Mayor precisión: La mayor estabilidad angular rotativa mejora la precisión y fiabilidad del movimiento.
  - Menor nivel de ruido debido a que existe mayor superficie de contacto. La rodadura es mucho más suave y los saltos son prácticamente inexistentes.
  - Mayor durabilidad: Por su rigidez torsional y mejor rodadura. Para mejorar esta característica, sus rodamientos ayudan a disminuir las pérdidas que se producirían al rozar el eje sobre la caja directamente. De esta forma, se consigue una mayor eficiencia del reductor y un funcionamiento mucho más suave.
  - Muy buenos niveles de eficiencia: Los reductores de tipo planetario ofrecen una mayor eficiencia ya que gracias a su diseño y disposición interna se minimizan las pérdidas durante su trabajo. De hecho, este tipo de mecanismos de accionamiento son los que ofrecen mayor eficiencia.
  - Mayor transmisión de par: Al haber más dientes en contacto, el mecanismo es capaz de transmitir y soportar más par. Además, lo hace de una forma más uniforme.
  - Máxima versatilidad: Su mecanismo queda contenido en una caja reductora cilíndrica, lo que permite su instalación en casi cualquier espacio.
- (Wikipedia, 2017)**

### **1.7. Accionamientos con variadores de frecuencia.**

Un variador de frecuencia (siglas VFD, del inglés: *variable frequency drive* o bien AFD *adjustable frequency drive*) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia,

---

a veces son llamados drivers VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia).  
**(Sinamics, 2004)**

### **1.7.1 Principio de funcionamiento.**

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$rpm = \frac{120 * f}{p} \quad Ec. 1.1$$

Dónde:

rpm = revoluciones por minuto

$f$  = frecuencia de suministro CA (Herzio)

$p$  = Número de polos (adimensional)

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores síncronos o en motor asíncrono son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación citada, resultarían en 3000 RPM, 1500 RPM, 1000 RPM y 750 RPM respectivamente para motores síncronos únicamente y a la frecuencia de 50 Hz. Dependiendo de la ubicación geográfica los motores funcionan en 50Hz o 60Hz.

En los motores asíncronos las revoluciones por minuto son ligeramente menores por el propio asincronismo que indica su nombre. En estos se produce un desfase mínimo entre la velocidad de rotación (rpm) del rotor (velocidad "real" o "de salida") comparativamente con la cantidad de rpm del campo magnético (las cuales sí deberían cumplir la ecuación arriba mencionada tanto en motores síncronos como en motores asíncronos) debido a que sólo es atraído por el campo magnético exterior que lo aventaja siempre en velocidad (de lo contrario el motor dejaría de girar en los momentos en los que alcanzase al campo magnético). **(Sinamics, 2004)**

---

### **1.8. Variadores de velocidad.**

El variador de velocidad (vsd, por sus siglas en inglés variable speed drive) es, en un sentido amplio, un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como accionamiento de velocidad variable (asd, también por sus siglas en inglés adjustable-speed drive). De igual manera, en ocasiones es denominado mediante el anglicismo drive, costumbre que se considera inadecuada.

La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o cuasi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, las cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. **(Sinamics, 2004)**

Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como en ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipos de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadoras, tornos y fresadoras.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua (sin ser un motor paso a paso) también puede ser designada como variador de velocidad. El control de procesos y el ahorro de la energía son las dos principales razones para el empleo de variadores de velocidad. Históricamente, los variadores de velocidad fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero. **(Sinamics, 2004)**

---

**Ventajas:**

- Operaciones más suaves.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en procesos variables.
- Permite operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permite el posicionamiento de alta precisión.
- Control del par motor (torque).

**1.8.1 Variadores para motores de CA.**

Los variadores de frecuencia (siglas afd, del inglés adjustable frequency drive); o bien vfd (variable frequency drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

**(Sinamics, 2004)**

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_s = \frac{120 * f}{p} \quad Ec. 1.2$$

Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_s = \frac{120 * f * (1 - s)}{p} \quad Ec. 1.3$$

Dónde:

ns - velocidad síncrona (rpm)

120 - velocidad mecánica (rpm)

f - frecuencia de alimentación (Hz)

s - deslizamiento (adimensional)

p - número de polos.

*Diagnóstico del sistema.*

---

Como puede verse en las expresiones (1.2) y (1.3), la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que, al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina

Estos variadores mantienen la razón voltaje/ frecuencia (v/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación v/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida. **(Sinamics, 2004)**

### **1.9. Diagnóstico del sistema:**

Para diagnosticar las características de funcionamiento del equipamiento montado se empleó el método descrito por **(Pérez, 1998)**. En el mismo se utilizan todos los datos de montaje y cinemáticos del equipamiento, con ellos se calcula la capacidad potencial de molida, a continuación, se calculan los ajustes o setting a emplear y, con el valor de las presiones recomendadas para lograr una buena extracción de jugo se calcula la energía que debe consumir cada una de las unidades motrices. Todos los datos se montan en hojas de cálculo Excel, con vistas a valorar distintos escenarios de trabajo posibles.

### **1.10. Capacidad de molida.**

Los cálculos para todo el sistema se desarrollaron por el programa ya descrito. **(Pérez, 1998)**. 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 expresión siguiente expresión que ha sido tomada del Hugot. **(Hugot, 1986)**

Diagnóstico del sistema.

$$Q = 0.9 * \frac{c * n * (1 - 0.06 * n * D) * L * D^2 * \sqrt{N}}{f} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Dónde:

Q – capacidad de molienda, en toneladas de caña/día.

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 tándem, en m.

N – número de mazas en el tándem.

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

El coeficiente relativo a los equipos de preparación ( c ) puede ser seleccionado en la tabla siguiente, que ha sido tomada del Hugot (**Hugot, 1986**):

**Tabla 1.1:** 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

**1.11. Consumo de potencia.**

$$N = \frac{n * D}{1.34 * \eta} * \left\{ F * \left[ 0.4 * \frac{6 * r - 5}{\sqrt{r} * (1 + \sqrt{r - 1})} * \sqrt{\varepsilon_A} + 0.05 \right] + 2 * L \right\} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Dónde:

N – potencia mínima a instalar en cada molino en kW.

n – velocidad angular de las mazas en rpm.

η – eficiencia total de la transmisión.

---

F – presión hidráulica total en toneladas fuerza (1000 kgf cada tonelada)

r - factor de reabsorción

$\xi_A$ – aberturas de las mazas relativas a los diámetros de las mismas

L – longitud de las mazas en mm.

Como se ha señalado ya, aquí aparecen los mismos elementos físicos que están presentes en la capacidad, esto es: diámetros de las mazas y longitudes; así como los que fija el técnico responsable de la molido en su decisión operativa, o sea: presión, velocidades angulares y setting. El factor de reabsorción (r) depende a su vez de la velocidad lineal del molino y de la densidad de la fibra en el plano axial de los cilindros de salida que se emplea como elemento básico en el cálculo de las aberturas dinámicas de trabajo. **(Pérez, 2003b)**

Con estos elementos puede demostrarse la estrecha relación que existe entre los factores a través de los cuales se alcanza una capacidad de molido determinada y el consumo de potencia necesario para lograrla. Debe tenerse en cuenta que cuando se habla de alcanzar una capacidad, este proceso está estrechamente relacionado con las características de la materia prima que se recibe para procesar y de los productos finales que se desean obtener. Dicho de otro modo, con la caña, el bagazo y el jugo. En la eficiencia tecnológica de esta operación de extracción también tiene una marcada influencia la cantidad de agua de imbibición, la temperatura de la misma y la forma de añadirla al colchón. **(Pérez, 2003a)**

Puede decirse entonces que el proceso que relaciona la capacidad y calidad de la molido con el consumo de potencia es bastante complejo, pero hay un grupo de elementos que son comunes a ambos factores operacionales y esto es lo que se desarrolla en el siguiente capítulo para lograr calcular, a partir de dichos elementos comunes, el consumo energético esperado por tonelada de caña y por tonelada de fibra. **(Pérez, 2003a)**

---

**Conclusiones parciales.**

1. La instalación de dos nuevas unidades motrices en el tándem del central Uruguay establece novedades importantes para este tipo de accionamiento en lo que se refiere a la industria azucarera cubana, ya que se emplearán reductores planetarios y variadores de frecuencia.
2. El diagnóstico que se estableció para analizar los cambios que se llevaron a cabo relaciona dos elementos de mucha importancia en el trabajo de un tándem como son la capacidad de molida y la potencia consumida, los que a su vez se encuentran relacionados entre sí.

---

**CAPÍTULO 2. Caracterización del equipamiento. Método empleado para los cálculos.**

A continuación, se desarrolla una caracterización de todo el equipamiento de recepción, preparación y molienda con que cuenta este ingenio. Nótese que se emplean unidades del SI y del Sistema Inglés para no hacerlo de manera diferente a como se emplean en AZCUBA.

**2.1. Caracterización del área de manipulación, preparación de caña y planta moledora en el Central Azucarero Uruguay en la zafra pasada.**

**2.1.1 Manipulación.**

Se cuenta con 6 esteras de caña con cadena SS-800 de 8 pulgadas de paso, con tablillas de acero. De estas, 3 son receptoras; 1 para carros jaulas de FFCC y 2 para camiones y remolques del tiro directo.

El virador de carros jaulas de FFCC descarga al conductor de caña No 1 por medio de 2 cilindros accionados por agua hasta un ángulo de 45° con capacidad de 50 toneladas accionados por bombas centrífugas del tipo 4H-5x2 de 2 etapas, fabricación soviética y 16 kg/cm<sup>2</sup>, impulsadas eléctricamente por motores de 28 kW, 440 Volt y 3520 rpm. Para los camiones y remolques del tiro directo se cuenta con 3 viradores; el No 1 que descarga en la estera de Tiro Directo No1, cuenta con 3 cilindros de agua accionados por bombas centrífugas de 183 m de carga y 68 m<sup>3</sup>/h de una sola etapa hasta un ángulo de 45°, con capacidad para 35 t impulsadas por motores eléctricos de 90 kW, 440 Volt y 3555 rpm. El virador No 2 que descarga también a la estera de Tiro Directo No 1 y el virador No 3 que descarga a la estera de Tiro Directo No 2 cuenta cada una con 2 cilindros telescópicos y bombas hidráulicas de 50 litros /min, 175 Bar de presión y 1500 rpm. Ambas están diseñadas para 40 t y un ángulo de descarga de 45°.

La estera de caña No 1 de 10 pies de ancho por 36.7 m de largo tiene 3 hileras de cadenas accionadas eléctricamente por un motor Skrage de 10/100 kW, 440 Volt y entre 130/1300 rpm acoplado a un reductor Skoda de 100 kW y 63/1 de relación. Esta estera descarga a la estera transversal No 2, que tiene 5 hileras de cadena, 10

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>20</sup> para los cálculos.*

---

pies de ancho por 18.8 m de largo con reductor Skoda de iguales características al anterior y motor Skrage de 5/50 kW, 440 Volt y entre 130/1300 rpm. La estera de caña No 3 se abastece de las esteras de caña No 2 y de la No 1 y 2 del tiro directo y tiene 7 pies de ancho por 39.1 m de largo con 4 hileras de cadenas, movida por un motor eléctrico de 75 kW, 440 Volt y 890 rpm con variador de frecuencia. Posee un reductor Skoda de las mismas características y abastece de caña a la estera No 4 (elevadora).

La estera de caña elevadora (No 4) es de 7 pies por 51.5 m con una inclinación de 16° con 4 hileras de cadena. Con reductor Skoda de 100 kW y 63/1 de relación, es accionada eléctricamente por un motor de 100 kW, 440 Volt y 1160 rpm con variador de frecuencia.

La estera del Tiro Directo No 1 de 10 pies de ancho y 39 m de largo posee 4 hileras de cadena y es accionada por un motor eléctrico del tipo Siemens de 54 kW, 480 Volt y 1175 rpm acoplado a un reductor del tipo PM-850 con 31.5/1 de relación de transmisión. La estera del tiro directo No 2 tiene 3 hileras de cadenas, es de 7 pies de ancho por 19.6 m de largo con reductor del tipo PM-750 de 31.5/1 y motor eléctrico de 40 kW, 440 Volt y 1190 rpm.

### **2.1.2 Preparación.**

Se cuenta con 4 niveladores de caña o gallegos y 3 juegos de cuchillas de caña del tipo MINAZ con 26 soporte y 104 machetes del tipo Suazaga cada una.

El nivelador No 1 se encuentra situado en la estera de caña No 2 con 22 brazos situados a través de su eje de forma helicoidal para distribuir el bulto de caña desde la descarga de la estera No 1 a todo lo ancho del conductor; la distancia de la punta del brazo a las tablillas es de 1400 mm. Es accionado por un motor eléctrico de 46 kW, 440 Volt y 1170 rpm con reductor Skoda de 50 kW. El nivelador No 2 se encuentra situado en el conductor No 3 antes del primer juego de cuchilla, tiene 16 brazos, 1000 mm de punta de brazos a tablillas y es accionado por un motor eléctrico de 54 kW, 460 Volt y 1185 rpm acoplado a reductor PM-750 de 31.5/1. El nivelador No 3 cuenta con 28 brazos, 1060 mm de distancia del brazo a las tablillas y con reductor Skoda de 50 kW y motor eléctrico de 15 kW, 440 Volt y 1180 rpm

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>21</sup> para los cálculos.*

---

está situado en la estera elevadora antes del 2do juego de cuchilla. El nivelador No 4, situado también en la estera elevadora, después del 3er juego de cuchilla cuenta con 24 brazos, 1350 mm de distancia del brazo a las tablillas con motor eléctrico de 36 kW, 440 Volt y 1170 rpm y reductor UZY-160 de 31.5/1.

El juego de cuchilla No 1 se encuentra situado en la estera de caña No 3, con una distancia de punta de diente del machete a la tablilla de 3 pulgadas y con un diámetro de giro de 1632 mm. Es accionada por un motor eléctrico de 800 kW, 6.3 Kv y 590 rpm acoplado rígidamente al eje de la cuchilla. El juego de cuchilla No 2, situado en la estera elevadora, también accionado por un motor eléctrico de 800 kW, 6.3 kV y 590 rpm y con acoplamiento rígido al eje de la cuchilla, tiene un diámetro de giro de 1868 mm y la distancia de punta de diente del machete a la tablilla de 2 pulgadas. El juego de cuchilla No 3, ubicado en la estera elevadora, es accionado por 2 motores eléctricos de 400 kW, 440 volt y 600 rpm cada uno, acoplados a ambos extremos del eje de la cuchilla por medio de acoplamientos flexibles. Su diámetro de giro es de 1708 mm y la distancia de punta de diente del machete a la tablilla de 1 pulgada.

Es de destacar que con los 3 juegos de cuchillas y la potencia instalada disponibles y con el auxilio de los niveladores se logran porcentos de preparación de caña de hasta un 98% y un índice de preparación del orden del 84 %.

Como equipos auxiliares en el área se dispone de un sistema de soplado y lubricación de las cadenas de las esteras de caña por medio de aire comprimido y un sistema de limpieza para la recolección del bagacillo desprendido debajo de los tres juegos de cuchilla durante la preparación de la caña. Este sistema cuenta con 4 sinfines recolectores, un conductor de banda elevador para el bagacillo y un limpiador de la superficie de las tablillas de la estera elevadora.

La estera de caña elevadora descarga al conductor de la tolva Donelly en el área de los molinos.

### **2.1.3 Planta moledora.**

El conductor de la tolva Donelly de 7 pies de ancho por 10 m de largo con 3 hileras de cadena de caña del tipo 1796 de 6 pulgada de paso y tablillas de acero accionado

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>22</sup> para los cálculos.*

por un motor eléctrico de 15 kW, 440 Volt y 1175 rpm y reductor del tipo U2Y 200 con relación 31.5/1, alimenta la tolva Donelly del primer molino.

**Molinos No 1 y 2:** Tipo Skoda de 4 mazas con vírgenes inclinadas, rayado de 3"x 35° en maza cañera de diámetro 44" por 7.08 pies de largo. Mazas bagacera y superior de 7.08 pies de largo con rayado de 3"x 45° y cuarta maza alimentadora de rayado 3"x 60°, diámetro 44" por 7.08 pies de largo. Perfil de corona S2 primer molino y SK1 en el segundo molino.

**Molinos Nos 3, 4, 5 y 6:** Tipo Skoda de 4 masas con vírgenes inclinadas, rayado de 2"x 35° en masa cañera de diámetro 44" por 7.08 pies de largo. Mazas bagacera y superior de 7.08 pies de largo con rayado de 2"x 45° y cuarta maza alimentadora de rayado 2"x 60°, diámetro 43.5" por 7.08 pies de largo. Perfil de corona SK1.

La distancia en todos los molinos entre centro de vírgenes es de 3080 mm y la de centro a centro entre molinos es de 6500 mm.

Cada molino en su etapa motriz contaba con reductores del tipo Skoda de 4 ejes y potencia de 1150 HP y relación de transmisión de 900/140 rpm. Accionados por motores eléctricos de 6.3 kV, el del 2do molino es del tipo YRKK560-8 de fabricación china, de 800 kW y 889 rpm y el de los molinos del 3 al 5, un AK313-62-8T4 de fabricación soviética de 630 kW y 900rpm cada uno.

Para esta zafra se instalaron en los molinos 1 y 6 dos unidades motrices compuestas, cada una, por un motor eléctrico, un reductor planetario y un acoplamiento de eslingas de poliéster entre el reductor y el molino. Presiones hidráulicas suministradas por medio de acumuladores Edwards, diámetros del cilindro de 17 pulgadas y presión de aceite para los molinos 1 y 6 de 2200 lb/pulg<sup>2</sup> y de 2000 lb/pulg<sup>2</sup> para los molinos del 2 al 5.

### **2.2. Modificaciones.**

Las modificaciones realizadas en esta zafra fueron la sustitución de 2 reductores tipo SKODA por dos reductores planetarios tipo GUIBE junto a dos motores en los molinos 1 y 6 con los siguientes datos:

- **Motor asíncrono trifásico de media tensión:**

Modelo: DK500

Potencia: 1000 kW

Polos: 4

Alimentación: 6300 V

Frecuencia: 60 Hz

Montaje: sobre patas B3

Motor accionado por variador de velocidad (10 a 60 Hz),

- **Control electrónico para motor de 1000 kW y 6,3 Kv: (Ver Anexo 3)**

Modelo: FRN46-4FA-63563-1470A

Tipología: Multinivel

Incluido Transformador

Tensión de entrada: 6,3 kV

Potencia: 1470 kVA

Factor de potencia entrada: > 0,96 a la velocidad nominal de giro

Protecciones a la entrada: Protección a sobretensión, protección a baja tensión, protección a sobre intensidad

Tensión nominal a la salida: 6,3 kV

Rango de frecuencias a la salida: 0 a 60 Hz

Resolución establecida de frecuencia: 0,005%

Sobrecarga: 150 A

Rendimiento: 97% a plena carga y a velocidad nominal

Altura: < 1000 mm

Masa: 5300 kg (neto)

- **Reductor Planetario (GUIBE):(Ver Anexo 1)**

N1-1800 1/min

N2 – 1/min

Masa: 37540 kg

Potencia – 1000 kW

Relación de transmisión: 288

- **Coples con Eslingas de poliéster: (Ver Anexo 2)**

El acoplamiento flexible con eslingas de poliéster para molino, tiene varias ventajas con relación al sistema de acoplamiento tradicional, y los de cables de acero, las principales son:

1. Permite flotación de la maza superior del molino de más de 1", sin riesgo para la transmisión del mismo.
2. Protege a la transmisión del molino de los efectos de desalineación producto de la flotación o por defectos en la instalación.
3. Mayor vida útil que los acoplamientos tradicionales.
4. Menor tiempo de montaje que los acoplamientos tradicionales.
5. Seguridad y protección del molino ante excesos de sobrecargas, las eslingas funcionan como fusibles.
6. Menor consumo de potencia.
7. La eslinga de poliéster es más económica que el cable de acero.
8. El acoplamiento con eslingas posee mayor confiabilidad que el de cable de acero al contar con 12 eslingas de las cuales 8 son de trabajo y 4 son de seguridad.

La lubricación de las chumaceras de los molinos se realiza por medio de 2 sistema centralizados para aceite tipo Farval.

Sistema de maceración con bandejas, canales y tanque colector; con 4 bombas verticales y 4 horizontales del tipo intupible. Las verticales bombean a las bandejas de los molinos y las horizontales a 2 coladores rotatorios con malla inoxidable de 0.75 mm pasando el jugo de estos a un tercer colador con malla inoxidable de 0.55 mm para un segundo colado y de este al tanque de guarapo de donde es bombeado para la fábrica por bombas de tipo Skoda de 2000 galones/ minuto. Estas bombas son impulsadas por motores eléctricos de 75 kW, 440 volt y 891 rpm. El agua de

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>25</sup> para los cálculos.*

imbibición aplicada es de hasta un 30 % de la caña molida controlándose el flujo por medio de una válvula de regulación automática y la existencia de un flujómetro para la medición del flujo por hora. La temperatura del agua es regulada por un sensor de temperatura de 2 válvulas automáticas, una de agua fría y otra de agua caliente. El molino 1 cuenta con tolva Donelly y los demás molinos con conductores intermedios tradicional sin tolva. Estos conductores intermedios tienen 7 pies de ancho por 4380 mm de largo, con una inclinación de 30°; cadena del tipo 907-E-51 y tablillas de acero de 3.17x 83,5 pulgadas sujetadas a la cadena por tornillos inoxidables de 5/8x1½ pulgadas con tuercas auto frenables. Todos son accionados por motores eléctricos de 10 kW, 440 Volt y 1160 rpm acoplados a reductores del tipo PM-400 de índice de reducción 31.5/1. La distancia de centro a centro entre el eje motriz y cola es de 3040 mm.

El sistema de enfriamiento de los molinos es por chumacera Skoda de acero revestida con metal patente F-5. El agua de enfriamiento es bombeada por 2 bombas, una trabajando y otra de repuesto de, 440 volt, 30 y 22 kW de potencia y 1766 y 1770 rpm respectivamente.

En estos momentos se puede recomendar una expresión final para el cálculo de la capacidad de molida.

### **2.3. Expresión final de la capacidad de molida para las condiciones de este ingenio.**

$$Q = 0.9 * \frac{c * n * (1 - 0.06 * n * D) * L * D^2 * \sqrt{N}}{f} \quad \text{Ec. 1.4}$$

c – coeficiente relativo a los equipos de preparación tomará un valor que no aparece en la tabla 1 tomada del **(Hugot, 1986)** y será de un valor de 1.4 para estas condiciones del ingenio.

Este coeficiente se aumentó tomando en cuenta los elevados grados de preparación de la caña que se logran en las condiciones actuales.

## **2.4. Análisis de las expresiones obtenidas a la luz de la aplicación de los cálculos de capacidad y ajustes (setting), factor de reabsorción, presiones y potencia recomendados en la literatura.**

Toda la metodología para el desarrollo de los cálculos se ha montado en hojas Excel, tomando como punto de partida el trabajo de doctorado de **(Pérez, 2003a)**. La misma calcula los siguientes elementos de importancia para el desarrollo del trabajo.

1. La velocidad lineal de las mazas, en m/min.
2. La capacidad de molida de caña, en t/día.
3. Los setting o ajustes entre mazas para cada molino.
4. El factor de reabsorción de cada molino.
5. Las fuerzas hidráulicas totales aplicadas sobre el colchón, en toneladas fuerza.
6. La potencia a consumir en la molida, en kW.

### **2.4.1 Velocidad lineal de las mazas.**

La velocidad lineal es un elemento de vital importancia en la eficiencia tecnológica y energética de un molino y del tándem en general. Si la velocidad es muy baja no se aprovecha adecuadamente la capacidad de molida y si, por el contrario, la velocidad lineal es muy elevada se produce un consumo elevado de energía que puede no traer aparejados ni una capacidad de molida ni una eficiencia tecnológica del sistema consecuente con la energía consumida.

Este factor está íntimamente relacionado con el diámetro de las mazas. **(Hugot, 1986)** Recomienda la siguiente relación empírica:

$$V_m = \frac{33 * D}{D + 0.73} \quad Ec. 2.1$$

Dónde:

V<sub>m</sub>- velocidad máxima recomendada en m/min

D- diámetro medio de las mazas en m.

La velocidad lineal de las mazas en un molino puede expresarse como:

$$v = \pi * D * n \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

V-es la velocidad real de las mazas en m/min

n-es la velocidad angular de las mazas, en rpm.

D-es el diámetro medio de las mazas, en m.

Una velocidad muy elevada da como resultado que el colchón de bagazo pase por la zona de máxima presión (considerada un 10 % del diámetro) en un tiempo muy pequeño y disminuye la eficiencia de la extracción. Por otra parte, como se ha señalado anteriormente, la velocidad influye directamente en el consumo de potencia en el proceso de molida.

#### **2.4.2 Capacidad de molida de caña.**

La capacidad de molida es la cantidad de materia prima que puede procesar el tándem en una unidad de tiempo. Pudiera pensarse que se alcanzan capacidades muy elevadas con solo aumentar la velocidad lineal o las aberturas entre mazas (setting). En realidad, la capacidad de molida es un compromiso entre los volúmenes de materia prima a procesar por el tándem y la eficiencia de la extracción en el mismo. En el Excel se expresa en t/día. La capacidad depende de un grupo de factores tales como: el número de molinos, el grado de preparación de la caña, el contenido de fibra en dicha caña, así como los datos geométricos y cinemáticos de cada molino (diámetros de las mazas y velocidades angulares de las mismas). En versiones modernas de cálculos de capacidad (**Hugot, 1986**) se considera la misma como dependiente del factor de reabsorción.

La expresión que se emplea en el trabajo para calcular la capacidad de molida es la deducida por (**Hugot, 1986**) y que se expresa como:

$$Q = 0.9 * \frac{c * n * (1 - 0.06 * n * D) * L * D^2 * \sqrt{N}}{f} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Dónde:

Q – capacidad de molida del tándem en toneladas por día.

c – factor que toma en cuenta la preparación de la materia prima, esto es, la cantidad de equipos de preparación empleados y la eficiencia de los mismos. Los valores recomendados por este autor oscilan entre 1,15 y 1,3. En este caso, como se explicó anteriormente se tomó un valor de 1,4 la preparación alcanzada por la caña.

n- velocidad angular de las mazas, en rpm.

D – diámetro de las mazas, en m.

L- longitud de las mazas, en m.

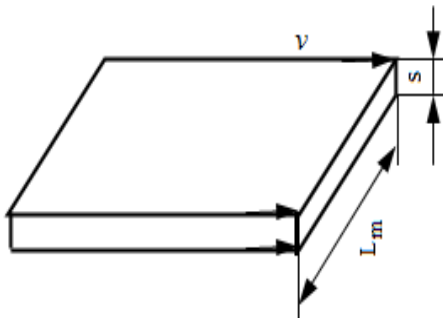
N – número de mazas en el tándem.

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

Debe aclararse que el valor de la fibra en caña es el que entra el 1er molino pues es el único que procesa directamente este material en la entrada, se utiliza como una fila corrida en todo el tándem pues su valor afecta a todos los molinos en su conjunto.

### **2.4.3 Ajustes o setting.**

Para el cálculo de setting se ha tomado el método de los volúmenes en tránsito recomendado por varios autores y descrito con precisión en el manual de planta moledora. Este método consiste en lo siguiente:



**Figura 2.1:** Flujo de fibra en el tándem.

Dónde:

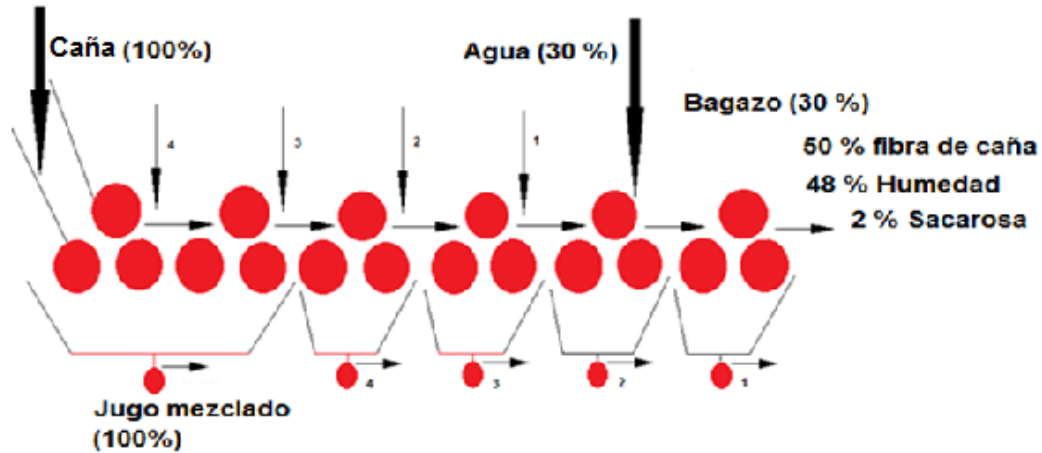
v - Velocidad periférica de las mazas, en m/min

s- Ajustes dinámicos (setting) en mm

L<sub>m</sub>- Longitud de las mazas, en m

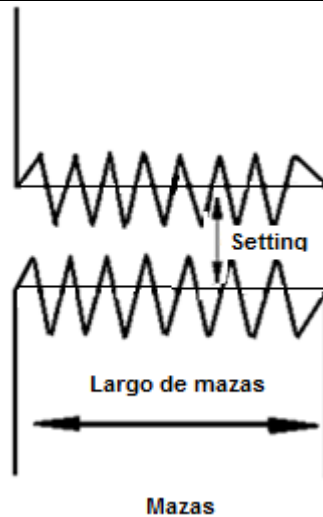
*Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>29</sup>  
para los cálculos.*

En la Figura 2.1, el colchón de caña se representa únicamente como la fibra, que es el único elemento que mantiene su flujo constante a lo largo del tándem. En su trabajo de diploma (**Monteagudo, 2017**) describe la complejidad del flujo de líquidos en los molinos, tal y como se representa en la Figura 2.2. La cantidad de agua y de sacarosa en el colchón es distinta en cada molino, pero la cantidad absoluta de fibra se conserva a lo largo del tándem.



**Figura 2.2:** Flujo de líquidos en el tándem.

Volviendo a la Figura 2.1, la misma representa un paralelogramo móvil, cuyo frente tiene como línea horizontal la longitud de las mazas y los ajustes o setting en la vertical. Dicho rectángulo tiene líneas quebradas en su parte superior e inferior ya que las mazas no son lisas (**Ver Figura 2.3**) pero como el setting se mide entre las líneas medias del rayado se consideran líneas rectas.



**Figura 2.3:** Representación frontal del espacio entre las mazas.

Por otra parte, las líneas horizontales móviles representan la velocidad lineal de las mazas, o sea, que la fibra, representada como un colchón se desplaza a lo largo del tándem en forma de un rectángulo móvil. Este rectángulo da lugar a la cantidad de fibra que se procesa por unidad de tiempo ( $\text{m}^3/\text{min}$ ), que, al dividirse entre el volumen específico, en  $\text{m}^3/\text{t}$ , expresa la masa por unidad de tiempo ( $\text{t}/\text{min}$ ) de fibra que se está procesando en el tándem.

Si se aplica la ecuación de continuidad al flujo que representa la fibra que circula por el molino se tiene que:

$$Q_f = \rho * A * v = \frac{A * v}{v} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Dónde:

$Q_f$  - es el flujo de fibra a lo largo del tándem, en  $\text{t}/\text{min}$

$\rho$  - es la densidad del colchón en  $\text{t}/\text{m}^3$  y que es el inverso del volumen específico  $v$  en  $\text{m}^3/\text{t}$ .

$A$  - es el área del rectángulo frontal mostrado en la figura 1, en  $\text{m}^2$ . Esta área es el producto de la longitud de las mazas  $L_m$ , en  $\text{m}$  por el setting o ajuste entre mazas

$s$ , en  $\text{m}$ , por lo que la capacidad puede expresarse como:

$$Q_f = \frac{L_m * s * v}{v} \quad \text{Ec. 2.4}$$

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>31</sup> para los cálculos.*

---

Dónde:

$v$  - es la velocidad del colchón, en m/s.

Al producto  $L_m * v$  se le denomina superficie de maza y tiene unidades de m<sup>2</sup>/min.

No debe confundirse con el valor de A, que es el rectángulo frontal móvil representado, como se ha dicho, por las longitudes de las masas y los ajustes y que se expresa en m<sup>2</sup>.

Aquí se puede despejar el ajuste o distancia entre mazas y se tendrá:

$$s = \frac{Q_f * v}{L_m * v} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Que como se ha planteado es el setting o distancia entre las mazas, en m. En el Excel se multiplica este valor por 1000 para tenerlo en milímetros pues los valores en metros son muy pequeños.

Estos valores de ajustes son los que tiene el tándem cuando está funcionando (settings dinámicos) para calcular los ajustes que deben medirse en el montaje se calculan los settings o ajustes estáticos, que pueden ser obtenidos restando la flotación de las mazas de los ajustes dinámicos.

El ajuste o setting que se calcula en la expresión anterior es el valor en funcionamiento o setting dinámico

Como la flotación de la maza superior se produce sobre la línea del cabezal superior de la virgen, que no coincide en inclinación con la línea de centros de las mazas, es necesario afectar esta flotación por la inclinación entre dichas líneas. Todas estas operaciones se realizan en el Excel.

Al final de esta parte del cálculo el usuario posee los valores de ajustes estáticos entre las mazas que se fijan en el momento del montaje por medio de galgas y que se miden desde el centro del rayado superior al centro del rayado de la maza inferior.

Los más importantes son:

- Entrada (E).
- Salida (S).
- Punta de cuchilla (P)

Estos elementos se muestran en la Figura 2.4.

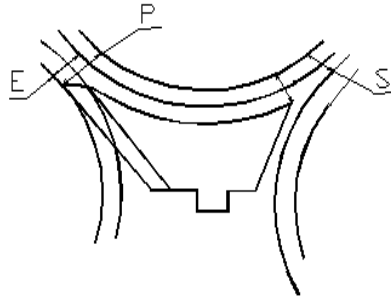


Figura 2.4: Ajustes estáticos.

#### 2.4.4 Factor de reabsorción.

El factor de reabsorción de cada molino es un elemento poco empleado en las fábricas de azúcar, pero de mucha importancia en la eficiencia tecnológica y energética de la extracción. En su edición del 86 (**Hugot, 1986**) incluyó en varias ocasiones este factor en la expresión para el cálculo de consumo de potencia en cada molino.

En este texto se plantea que:

“Podemos usar el término "**coeficiente de exceso de velocidad**" para la relación  $r$  de la velocidad media del material a través del molino con la velocidad periférica de los cilindros. Esta relación también se denomina "factor de reabsorción" o "coeficiente de deslizamiento". El último término es poco apropiado, ya que uno normalmente no piensa en un deslizamiento negativo a alta presión; "Factor de deslizamiento hacia adelante" sería quizás un término más descriptivo.

Este factor se calcula fácilmente cuando se conoce el volumen del material y el volumen generado por los cilindros:

$$r = \frac{V_B}{V_E} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$r$  - factor de reabsorción

$V_B$  - volumen del bagazo a medida que pasa a través de la abertura de salida

$V_E$  - volumen generado en la apertura de salida por la rotación de los dos cilindros”.

Este valor se recomienda como normal entre 1 y 1,2. Cuando alcanza valores mayores que 1,2 el molino disminuye la eficiencia en su extracción.

La expresión que emplea este autor para calcular dicho factor es

$$r = k + 0.017 * \gamma + 0.65 * \rho \quad \text{Ec. 2.7}$$

Dónde:

r - es el factor de reabsorción (valor adimensional).

v - es la velocidad lineal de las mazas, en m/min

$\rho$  - es la densidad del colchón en t/m<sup>3</sup>

Este autor plantea que el valor de k puede tomarse como:

0,75 para un primer molino.

0,65 para un 2do molino.

0,6 para los molinos siguientes.

En el Excel se trabaja con el volumen específico  $v$ , en m<sup>3</sup>/t que es el inverso de la densidad.

#### **2.4.5 Fuerzas hidráulicas totales aplicadas sobre el colchón.**

En el Excel se calculan las presiones que actúan en cada molino.

Este factor es el que permite la compresión del colchón, que coadyuva a la extracción de jugo del colchón de bagazo. Aquí se emplean unidades mixtas (del SI y del Sistema Inglés) pues así se sigue empleando en los centrales azucareros cubanos.

La presión se analiza desde varios puntos de vista:

1. La presión hidráulica ( $p_h$ ) en la línea de aceite que alimenta los pistones que actúan sobre la tapa superior del pedestal de la maza superior. En este trabajo la misma se expresa en lbs/pulg<sup>2</sup>.
2. La fuerza hidráulica total que se calcula mediante la expresión.

$$FHT = 2 * 0.785 * D_p^2 * \frac{p_L}{2200} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Dónde:

FHT - es la fuerza hidráulica total sobre la maza superior, en toneladas fuerza,

1 tf = 1000 kgf = 2200 lbf

Dp - es el diámetro del pistón en pulgadas

$p_h$  - es la presión hidráulica en la línea de aceite que alimenta los pistones del molino y que fue descrita en el inciso a).

*Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>34</sup>  
para los cálculos.*

---

3. Los valores de la presión específica sobre el colchón (PE), los cuales se calculan para compararlos con los valores que recomienda (**Hugot, 1986**). Este autor establece los valores en tf/dm<sup>2</sup> y los calcula por la siguiente expresión:

$$PE = \frac{FHT}{0.1 * D * L} \quad Ec. 2.9$$

El valor de la FHT y sus unidades son ya conocidos. El valor en el denominador de la expresión representa la superficie imaginaria de contacto de la maza superior con el colchón, en que coinciden todos los autores que es el producto de la longitud de la maza por la décima parte de su diámetro. Como los valores de L y D se expresan en m en el Excel será necesario multiplicar ambos por 10 ya que 1m<sup>2</sup> equivale a 100 dm<sup>2</sup> y entonces la expresión final queda:

$$PE = \frac{FHT}{10 * D * L} \quad Ec. 2.10$$

En el texto citado se enumeran los valores que se emplean en distintos países y que oscilan entre 20 tf/dm<sup>2</sup> y 25 tf/dm<sup>2</sup>. Es importante aclarar que este criterio tiene que ver con la extracción de jugo desde el colchón.

4. Los valores de la fuerza lineal (FL) que se expresan en tf/pie de longitud de maza. En el Excel estos valores se calculan como:

$$PE = \frac{1.1 * FHT}{3.28 * L} \quad Ec. 2.11$$

Esto se debe a que los valores de referencia se establecen en el Manual de Planta Moledora (**MINAZ, 1996**) en toneladas por pie de longitud de maza. Este texto recomienda para Cuba valores máximos entre 60 toneladas/pie y 70 toneladas/pie y responde básicamente a criterios de resistencia pues la mayoría de los tándems en Cuba ya tienen muchos años trabajando y pueden fallar mecánicamente cuando se les somete a esfuerzos muy elevados.

#### **2.4.6 Potencia de los molinos (kW).**

Este es un elemento energético, pero también económico y tiene mucha influencia en el impacto medioambiental. En su expresión de cálculo se emplean muchos de

## Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>35</sup> para los cálculos.

los elementos que se han analizado anteriormente en este trabajo. Se utiliza la expresión deducida por **(Pérez, 2003b)** en su trabajo de doctorado:

$$N = \frac{n * D}{1.34 * \eta} * \left\{ F * \left[ 0.4 * \frac{6 * r - 5}{\sqrt{r} * (1 + \sqrt{r - 1})} * \sqrt{\varepsilon_A} + 0.05 \right] + 2 * L \right\} \quad Ec. 1.5$$

Dónde:

N – potencia mínima necesaria del motor en kW

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

$\eta$  - eficiencia de la transmisión

D – diámetro de las mazas en m.

F – fuerza hidráulica total en t (2200lbs).

r – factor de reabsorción.

$\varepsilon_A$  – abertura específica de salida.

L – longitud de las mazas en m.

La abertura específica de salida se calcula como:

$$\varepsilon_A = \frac{0.001 * sds}{D} \quad Ec. 2.12$$

Dónde:

*sds* - es la abertura de trabajo de cada molino a la salida del mismo en mm

D - es el diámetro de la maza superior en m

El factor de reabsorción y la abertura relativa de salida fueron empleados por primera vez por parte de **(Hugot, 1986)** para desarrollar este cálculo.

En el caso del primer molino el valor de 0,4 empleado dentro del corchete debe tomarse como 0,5 para tener en cuenta que todavía este molino invierte una parte de la energía en la preparación del colchón.

### 2.5. Descripción del Excel.

Cada uno de los molinos está completamente caracterizado en su actuación por una columna.

En la hoja de cálculo están coloreadas en amarillo las celdas de toma de datos, en blanco los cálculos preliminares que sirven de base a otros de mayor importancia y

## *Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>36</sup> para los cálculos.*

---

en verde los cálculos definitivos que sirven para cumplir los objetivos más importantes del trabajo.

La secuencia de cálculos por filas puede describirse como sigue:

- En la fila 1 se describe el escenario en que se produce el cálculo, en este caso son los datos para la zafra actual
- La fila 2 sirve para señalar la unidad de molida. En el caso del Uruguay el tándem posee 6 molinos.
- En las filas de la 3 a la 6 se alimentan los datos relativos al rayado de las mazas.
- La fila 8 es común para todos los molinos ya que aquí se representa la fibra en caña con relación a la unidad. Este es el valor estimado para la zafra actual y se unen todas las celdas de la fila, de acuerdo con el criterio anteriormente expresado.
- Las filas 8 y 9 se refieren a la velocidad angular de los motores y la relación de transmisión de los reductores.
- La fila 10 toma las longitudes de las mazas, en m.
- En la fila 11 se desarrolla el primer cálculo, esto es, con la velocidad angular del motor y la relación de transmisión se calcula la velocidad angular de la maza superior de cada molino y, por tanto, la velocidad angular de las 3 mazas de trabajo del molino ya que las tres coronas poseen igual número de dientes.
- En las filas 13 y 14 se hace uso de relaciones geométricas y trigonométricas y se calcula la profundidad del rayado de la maza motriz y su diámetro medio.
- En la fila 15 se calcula la velocidad lineal de la maza motriz del molino.
- En la fila 16 y haciendo uso de la fórmula de **(Hugot, 1986)** se calcula la capacidad potencia de molida del tándem.
- En la fila 17 se asume una capacidad de molida que debe estar por debajo la potencial. En Cuba se asume normalmente una capacidad de un 80 % de la potencial, para no recargar demasiado desde el punto de vista mecánico a los molinos. En este caso se asumió un valor más elevado, cerca del 94 % de la capacidad potencial.

*Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>37</sup>  
para los cálculos.*

---

- En la fila 18 se calculan las toneladas métricas de fibra por minuto a procesar a lo largo del tándem.
- En las filas 19, 20 y 21 se alimenta la hoja con las relaciones entrada/salida moliendo, punta de cuchilla entrada moliendo y volumen unitario en la salida. Para el caso de la primera y última unidad se asumen valores recomendados por el método de los volúmenes en tránsito utilizado en el **(MINAZ, 1996)** y los valores intermedios se calculan mediante una relación logarítmica, tal como se recomienda en la literatura azucarera y en el propio manual.
- De la fila 22 a la 26 se calculan los volúmenes unitarios y en tránsito en los puntos de cada molino ya descritos en las filas anteriores.
- En la fila 27 se calcula la superficie descrita por la circunferencia media de la maza superior, en metros cuadrados por minuto.
- En las filas 28, 29 y 30 se calculan los ajustes dinámicos a la entrada, la salida y en la punta de la cuchilla de cada molino.
- En la fila 31 se fijan los valores recomendados por el **(MINAZ, 1996)** para la flotación de la masa superior.
- En las filas 32 y 33 se expresan las relaciones variaciones entre las aberturas de entrada y salida con la flotación de acuerdo con las recomendaciones del **(MINAZ, 1996)** y en las filas 33 y 34 se calculan las variaciones entre esas aberturas mediante las relaciones anteriores.
- En las filas 36 y 37 se establecen dichas relaciones y el cálculo correspondiente para la punta de la cuchilla.
- En las filas 38, 39 y 40 ya son calculados los valores de los ajustes estáticos en la entrada, en la salida y en la punta de la cuchilla, o sea, los que deben fijarse en el momento de montar el molino y a los que los azucareros denominan setting.
- Los valores calculados en la fila 41 son de vital importancia para el análisis que se hace en este trabajo sobre el funcionamiento del tándem. Estos valores no han sido muy tratados por la literatura. **(Hugot, 1986)** les denominó "factor de reabsorción y expresan la relación entre el volumen del colchón que atraviesa la zona de salida del molino y el volumen desarrollado

por las generatrices de las mazas en ese mismo plano. Con valores de este factor por encima de 1,2 se debe esperar un funcionamiento no adecuado en la extracción de cada molino y del tándem en general. La expresión que se emplea en esta fila es la recomendada por **(Hugot, 1986)**.

- De la fila 42 a la 44 se desarrolla el cálculo de las presiones aplicadas sobre el colchón de caña. Para el mismo se introducen las presiones hidráulicas en la línea de aceite que alimenta los pistones, en lbs/pulgada cuadrada y el diámetro de los pistones. A continuación, se calcula la fuerza hidráulica total en tf por la siguiente expresión:

$$FHT = 2 * 0.785 * D_p^2 * \frac{p_L}{2200} \quad Ec. 2.8$$

Dónde:

FHT - es la fuerza hidráulica total sobre la maza superior, en tonelada fuerza.

Dp - es el diámetro del pistón en pulgadas

p<sub>h</sub> - es la presión hidráulica en la línea de aceite que alimenta los pistones el Molino, en libras por pulgada cuadrada.

- En la fila 45 se calculan las presiones específicas (PE) sobre el colchón en toneladas fuerza por pie de longitud de maza, para lo cual se divide la fuerza hidráulica total en tf sobre la longitud de la maza en pies. Los valores recomendados en el manual de planta moledora para este parámetro están alrededor de 60 a 70.
- En la fila 46 se establece el cálculo del consumo de potencia en kW para estas condiciones de trabajo. Para ello se empleó la expresión deducida por **(Pérez, 2003b)** en su trabajo de doctorado.
- En la fila 47 se establece el cálculo de la presión específica sobre el colchón en tf/dm<sup>2</sup>. Los valores de la misma se recomiendan, según **(Hugot, 1986)** entre 20 y 25.

Los valores de la fuerza hidráulica total no se utilizan en tf en el Sistema Internacional, sino en N o kN. En este trabajo se han desarrollado en esas unidades

*Capítulo 2: Caracterización del equipamiento. Método empleado <sup>39</sup>  
para los cálculos.*

---

pues es el sistema que aún se utiliza en los centrales. En la fila 51 se calculan estos valores en kN, o sea, en el SI.

**Conclusiones parciales.**

Con el Excel se calculan 6 valores fundamentales:

1. La velocidad lineal. Este parámetro tiene dos consecuencias fundamentales: Si es muy bajo se desaprovecha la capacidad del tándem. Si es muy elevado se afecta la extracción y se aumenta el consumo de potencia.
2. La capacidad, que es el parámetro tecnológico fundamental en un tándem de molinos. De hecho, en Cuba, los tándems se clasifican específicamente por su capacidad de molida.
3. Los ajustes (Setting), que son valores bastante mencionados por el personal de la industria azucarera, y que constituyen la medida de la abertura entre las mazas y definen la capacidad de molida y la eficiencia del tándem.
4. El factor de reabsorción, que es muy poco mencionado en el mundo y en particular en Cuba, pero establece límites a la velocidad lineal de las mazas y a la compresión del bagazo.
5. Las presiones sobre el colchón que son, junto con la velocidad, el factor que más influye en el consumo de potencia en la molida, pero a su vez y hasta de ciertos límites aumenta la eficiencia de la extracción.
6. La energía consumida en cada molino, que es el factor que considera la eficiencia energética del proceso. El Excel establece el cálculo en kW, pero es muy importante este consumo relacionado con la molida y en particular con el flujo de fibra a través del tándem.

**CAPÍTULO 3. Análisis de los resultados obtenidos. Comparación con el diagnóstico.**

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la realidad y se comparan con los del modelo, caracterizado por los valores de la hoja de cálculo Excel. Debe recordarse que en los cálculos se analizaron los siguientes factores:

1. Velocidad lineal.
2. Capacidad de molida.
3. Los ajustes entre mazas (setting).
4. Factor de reabsorción.
5. Las presiones en cada molino.
6. El consumo de potencia en la molida.

Las filas de la 1 a la 15 no presentan variaciones entre los cálculos y los valores reales pues son elementos concretos que dependen de las dimensiones de las mazas, de las velocidades de los elementos motrices y de las relaciones de transmisión empleadas.

Estos factores no se analizan directamente, pero influyen en 5 de los factores analizados.

Solo en el caso de los molinos 1 y 6, si con el variador de frecuencia, sí se cambiara la velocidad de los motores, pudiera variar la velocidad angular de las mazas y la consiguiente velocidad lineal del molino, lo que a su vez influiría sobre la capacidad de molida. Para el cálculo inicial de capacidad se asume que el motor mantiene su velocidad nominal de chapa, incluso para los molinos 1 y 6.

En la fila 17 se asume una capacidad real algo menor que la potencial calculada.

En realidad, esta ha sido una zafra de mucha deficiencia en el abastecimiento de caña y los valores reales de molida han estado muy por debajo de los máximos recomendados.

En el reporte de la molida acumulada en %, en Uruguay se ha tomado como base el valor potencial máximo de 9200 t/día que era el que tenía el tándem antes de las modificaciones que se hicieron. A pesar de esto el valor acumulado de molida durante la zafra es solo del 53 % del valor citado. Este valor acumulado no depende

### *Capítulo 3: Análisis de los resultados obtenidos. Comparación con el <sup>42</sup> diagnóstico.*

de la capacidad potencial del tándem sino de deficiencias en el abastecimiento de caña y también algunas internas de la fábrica.

El flujo de fibra a lo largo del tándem (fila 18) se ha tomado a partir de una molida 10 000 toneladas de caña por día y de una fibra en caña de 0,15 con relación a la unidad, por lo que se supondrá como el flujo máximo de fibra esperado. Al calcular el valor para un minuto se divide por 24 y por 60 y da como resultado el valor de 1,04 toneladas de fibra por minuto.

Entre las filas 19 y 40 se establecen los cálculos para determinar las aberturas estáticas necesarias en cada molino, en las zonas de la entrada del mismo, a la salida y la distancia entre la maza superior y la cuchilla. Como se ha señalado antes todos esos cálculos se realizaron sobre la base de las recomendaciones del Manual de planta moledora (**MINAZ, 1996**), de la literatura especializada (**Hugot, 1986**) y el trabajo de doctorado (**Pérez, 2003a**), o sea, se empleó el método de los volúmenes en tránsito.

En la fila 41 se calcula el factor de reabsorción para cada molino sobre la base de la velocidad lineal, que es un valor real y del volumen específico o unitario a la salida del molino, recomendado en el método empleado.

Los valores de los ajustes de la maza superior a la punta de la cuchilla reales no se han tomado en cuenta, pero los ajustes de entrada y de salida que se fijaron en el tándem difieren sustancialmente de los necesarios calculados en el Excel.

Véase la tabla siguiente:

**Tabla 3.1:** Valores de los ajustes obtenidos en el Excel, en mm.

<b>MOLINOS</b>	<b>1M</b>	<b>2M</b>	<b>3M</b>	<b>4M</b>	<b>5M</b>	<b>6M</b>
<b>Entrada</b>	61.7	77.9	73.5	72.3	71.2	60.1
<b>Salida</b>	37.8	43.8	36.4	31.5	27.2	19.3

**Tabla 3.2:** Valores de los ajustes obtenidos reales, en mm.

<b>MOLINOS</b>	<b>1M</b>	<b>2M</b>	<b>3M</b>	<b>4M</b>	<b>5M</b>	<b>6M</b>
<b>Entrada</b>	77	101	93	93	78	77
<b>% de variación</b>	25	29,6	26,5	28,6	9,5	28
<b>Salida</b>	36	26	26	28	17	16
<b>% de variación</b>	-4,8	-40,6	-28,6	-11,1	-37,5	-20,6

En la tabla 3.2 se recalca lo planteado en el párrafo anterior. Los valores calculados inicialmente toman en cuenta todas las recomendaciones establecidas en Cuba y en otros países para el cálculo de estos ajustes.

Las diferencias muestran una tendencia general para esta zafra, en esta fábrica, de colocar ajustes más abiertos en la entrada y más cerrados en la salida. Esto puede influir en dos aspectos básicos:

- La extracción en cada uno de los pares (entrada-salida) difiere de los valores esperados y recomendados por la literatura ya que el par de alimentación trabajará con menos esfuerzo al estar las mazas más separadas entre sí y el de salida será, al contrario.
- El trabajo de los pares de compresión, ya que de la manera que se ha montado cada molino, tiende a disminuir el consumo de potencia en la primera compresión y hacer más elevado el consumo de potencia en la segunda compresión. Esta tendencia puede llegar a compensar el consumo total de energía en el molino completo, pero esto es impredecible pues los métodos de cálculo están establecidos sobre la base de que se cumpla lo recomendado.

En este caso los esfuerzos sobre los componentes de la segunda compresión pueden ser más elevados de lo normal y esto tiende a producir fallas en los mismos (sobre todo en el guijo).

En realidad, la variación de las aberturas de una manera arbitraria puede deberse al hecho de que se modificaron sustancialmente las condiciones de operación del

*Capítulo 3: Análisis de los resultados obtenidos. Comparación con el* <sup>44</sup>  
*diagnóstico.*

1ro y del 6to molino sin variar las de las otras unidades. Esto se hizo casi a punto de comenzar la zafra y en medio de la contienda fue necesario tomar medidas para garantizar una molida ya de por sí inestable, en medio de una zafra tan compleja. Estas irregularidades se observaron en un reporte de tiempo perdido que se obtuvo **(Ver Anexo 4)**. Debe aclararse que este anexo se tomó literalmente de un reporte de la fábrica, por lo que se ha respetado la ortografía y la redacción del original.

Por otra parte, el factor de reabsorción también tiene variaciones sustanciales para estas condiciones ya que el mismo depende de la velocidad, que no varía para el sistema real, pero también depende del volumen específico, que a su vez depende de las aberturas reales que se colocaron en el tándem.

En la hoja de cálculo # 1 se tomaron como datos las aberturas reales que se colocaron en el tándem para esta zafra y se desarrolló un proceso inverso al utilizado para calcular las aberturas teóricas en la hoja 2 y con ello se calculó el factor de reabsorción real que tuvo cada molino en su trabajo.

**Tabla 3.3:** Valores reales y recomendados del factor de reabsorción obtenidos en el Excel (hoja 1 y hoja 2).

<b>MOLINOS</b>	<b>1M</b>	<b>2M</b>	<b>3M</b>	<b>4M</b>	<b>5M</b>	<b>6M</b>
<b>Factor de reabsorción real</b>	1.59	1.82	1.81	1.75	2.23	2.16
<b>Factor de reabsorción calculado</b>	1.42	1.30	1.31	1.36	1.42	1.52
<b>% de error</b>	11 %	28 %	27 %	22 %	36 %	29 %

De la tabla 3.3 se infiere que al colocar aberturas que difieren sustancialmente de las recomendadas ha aumentado el factor de reabsorción, lo que tiende a influir sobre la eficiencia de la extracción.

En cuanto a la presión que se aplica sobre el molino ocurre lo mismo que con la velocidad. La misma fue tomada de datos reales y no varía en la hoja 1 en comparación con la 2.

*Capítulo 3: Análisis de los resultados obtenidos. Comparación con el* <sup>45</sup>  
*diagnóstico.*

**Tabla 3.4:** Comparación de la potencia estimada para los valores recomendados y para los valores reales, en kW.

<b>Potencia calculada con los valores recomendados.</b>	522	383	374	373	372	449
<b>Potencia calculada con los valores reales.</b>	460	345	353	359	311	369
<b>% de diferencia.</b>	11.8	10.0	5.8	4.6	16.4	17.9

Nótese que en todos los casos los valores reales calculados tomando en cuenta la situación real que se presenta han disminuido respecto a la que se calcula mediante las consideraciones de la literatura y es que en esta expresión se toma en cuenta el factor de reabsorción, que ha aumentado y por su situación en la expresión tiende a disminuir el resultado del consumo de potencia.

Pero el elemento que más influye sobre esta disminución es que se han montado los molinos con aberturas de salida menores que las recomendadas y como el diámetro de las mazas se mantiene, constante el valor  $\epsilon_A$  disminuye y con esto disminuye el consumo de potencia calculada.

Las lecturas reales de consumo de potencia a lo largo de la zafra no fue posible tomarlas pues las molidas fueron muy inestables (el ingenio tuvo un acumulado de molido muy bajo, tal como se ha dicho anteriormente). Por esto se tomaron una serie de 24 lecturas durante un tiempo determinado para molidas algo más estables y se promediaron las mismas. El valor fue de 426 kilowatt para el primer molino y de 402 kW para el último molino. En los molinos intermedios no se pudieron hacer lecturas por encontrarse defectuosos los instrumentos de medición.

A modo de comparación, en las hojas de cálculo también se determinaron los valores de consumo de potencia calculados por el método de Barreiro, los mismos no sufren alteraciones ya que en este método solo se tienen en cuenta la velocidad lineal de los molinos y la fuerza hidráulica total.

En realidad, los valores obtenidos en esta zafra pueden no ser representativos de la realidad por la gran inestabilidad del trabajo del tándem a lo largo de la zafra.

**Conclusiones parciales**

1. El montaje de dos unidades motrices a la entrada y a la salida del tándem, muy diferentes de las otras 4, trajo como consecuencia que se tuvieron que hacer ajustes no previstos en las aberturas de entrada y salida. Esto puede haber tenido influencias en la extracción, pero no puede ser corroborado, debido a la inestabilidad de la molida. Esta es la mayor irregularidad que se observa en el trabajo del sistema.
2. Las velocidades lineales de la 1era y la 6ta unidad difieren de las otras en alrededor de un 20 % y no se produce una uniformidad en las diferencias a lo largo del tándem.
3. La capacidad de molida potencial no aumentó de acuerdo con las expectativas que se tenían cuando se comenzó la inversión ya que esto no se logra si no se hacen modificaciones en todo el tándem de una manera lógica y acertada.
4. El factor de reabsorción real tuvo variaciones acordes con los volúmenes reales específicos que se obtienen con las aberturas reajustadas.
5. Las presiones se comportan de una manera normal de acuerdo a lo recomendado en la literatura.
6. En cuanto a la potencia calculada se producen variaciones entre los valores esperados cuando se hicieron las modificaciones y los que se obtuvieron para las condiciones recomendadas, pero esta situación debe seguirse analizando pues las lecturas reales de consumo que se lograron pueden estar influidas por la inestabilidad en la molida.

## **CONCLUSIONES**

1. Cuba ha decidido una modificación significativa de su matriz energética desde ahora hasta el 2030 y en dicha modificación se incluye el montaje de centrales bioeléctricas en varios ingenios azucareros del país. Se habla de 25 centrales bioeléctricas con una capacidad de generación total de 870 MW.
2. Si se logran estos cambios se producirá un beneficio importante en la economía del país y en el ahorro de combustibles fósiles, pero, por el costo de estas inversiones, las mismas tienen una elevada dependencia de la oportunidad de inversiones extranjeras.
3. En la zafra pasada el tándem del Central Uruguay estaba compuesto por 6 motores Skoda, con un reductor de la misma marca con un acoplamiento de cardán. En esta zafra se renovaron las unidades motrices del 1ro y 6to molino por dos motores españoles marca Guibe, dos reductores planetarios españoles de la misma marca, con una potencia de instalación de 1000 kW y un acoplamiento de eslingas de poliéster, además se instalaron dos variadores de frecuencia. Esto ocurrió en cada una de las dos unidades. Inicialmente se esperaba un incremento de la molienda potencial de 9 200 a 13 000 toneladas por día, cosa que no se ha logrado en la vida real. El Excel que se propone para el diagnóstico de este proyecto lo demuestra así.
4. La comparación entre los valores del modelo en Excel, basado en las recomendaciones de la literatura y los calculados de acuerdo con las condiciones reales de montaje difieren principalmente en las velocidades de la 1era y la 6ta unidad y sobre todo en las aberturas que se montaron, las cuales no responden a un orden adecuado.
5. En el montaje del tándem para esta zafra se fijaron valores de abertura de entrada y salida prácticamente iguales en la 3era y 4ta unidad y en la 5ta y 6ta, respectivamente. Esto contradice todas las recomendaciones de la literatura especializada sobre la progresión de trabajo en los molinos de un tándem y el decrecimiento gradual de las aberturas en todas sus unidades.

**RECOMENDACIONES**

1. Es importante continuar analizando en el país, para cada ingenio, las modificaciones que se pueden seguir estableciendo en la generación de electricidad a partir de la biomasa cañera para cumplir con la perspectiva de trabajo del país. En esto debe tener una influencia muy importante la inversión extranjera.
2. En este caso del Central Uruguay deben analizarse las características de diferencia del 1er y 6to molino con relación a los demás y tratar de ajustarlos progresivamente a una uniformidad en el trabajo de cada uno. Esta situación debe de tenerse en cuenta en un futuro cuando se vayan a hacer inversiones en el tándem

**BIBLIOGRÁFÍAS REFERENCIADAS.**

1. COTRANSA. 1996. Manual de Mantenimiento “Motorreductores serie Pla [Online]. Available: [www.cotransa.net](http://www.cotransa.net).
2. CURBELO 2003. Contribución de la biomasa cañera a la generación de electricidad en Cuba.
3. GRANMA, P. 29 de mayo de 2017.
4. HERSCOVICI 1996. Caja de engranes de tipo planetario de alta potencia para reducir los costos de funcionamiento y mejorar la eficiencia de los molinos.
5. HUGOT, E. 1986. Handbook of sugar cane engineering, Amsterdam, Holanda.
6. MINAZ 1996. Manual de operaciones de la planta moledora.
7. MIÑO 2015. Energía Renovable. Conceptos Básicos.
8. MIÑO 2016. Energía Renovable. Conceptos Básicos.
9. MIÑO, S. S. 2003. Energía Renovable. Conceptos y aplicaciones.
10. MONTEAGUDO. 2017.
11. PÉREZ. 1998. Estudio del consumo de potencia en los molinos de caña. Universidad Central
12. PÉREZ. 2003a. Análisis de la correlación entre el consumo de potencia en un molino de caña de azúcar y las variables operativas del mismo. Universidad de Las Villas.
13. PÉREZ. 2003b. Estudio del consumo de potencia en los molinos de caña. Universidad Central
14. SINAMICS 2004. Variadores electrónicos de frecuencia.
15. WIKIPEDIA 2017.

**BIBLIOGRAFÍAS UTILIZADA.**

16. Bora, K.N. 1999. “Review of mill setting calculation”, Indian Sugar, 41 (1), 9-22.
17. Cant, C., “Mill pressure feeders, and alternative drive methods”, International Sugar Journal, marzo,
18. Cullen, R.N.; McKay, B.R. 1996. “A review of the influence of mill size on milling capacity”, ISJ, 95 (1132) 144-148.
19. Deer N. 1912. “The milling of cane considered in relation to the volume occupied by the fiber”, Agricultural Service Bulletin No. 28, Hawaiian Sugar planters Association, Hawaii.

20. Douglas, T. P.; Picaro, T.; White, E. T. 1991. "Friction between a moving fiber bed and a stationary wall", Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, Brisbane, Australia 313-321.
21. Herrera E. 1995. "El consumo de potencia en los molinos", Criterios actuales sobre la Industria Azucarera Cubana, MINAZ, La Habana, Cuba.
22. Jenkin, D. M. 1983. "Medición del Torque en los Molinos", Memorias del XVIII Congreso de la ISSCT, Factory Comisión, La Habana.
23. Kent, G.A.; Mackenzie, N.J. 1999. "An improved understanding of mill feeding", Proceedings of the 1999 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 27-30, Australia.
24. MINAZ, 1995. "Criterios actuales de la industria azucarera cubana" , Dirección de Maquinaria Industrial, La Habana.
25. Murry, C.R.; Holt, J.E. 1971. "The Mechanics of crushing sugar cane", Edición Revolucionaria, La Habana, Cuba.
26. Pérez C., E .E. 1996. "Estudio del consumo de potencia en los molinos de caña", Tesis de Maestría, Universidad Central, Villa Clara, Cuba.
27. Pérez C., E. E. 1997. "Maquinaria Azucarera", monografía, Universidad Central, Villa Clara, Cuba.

**ANEXOS**

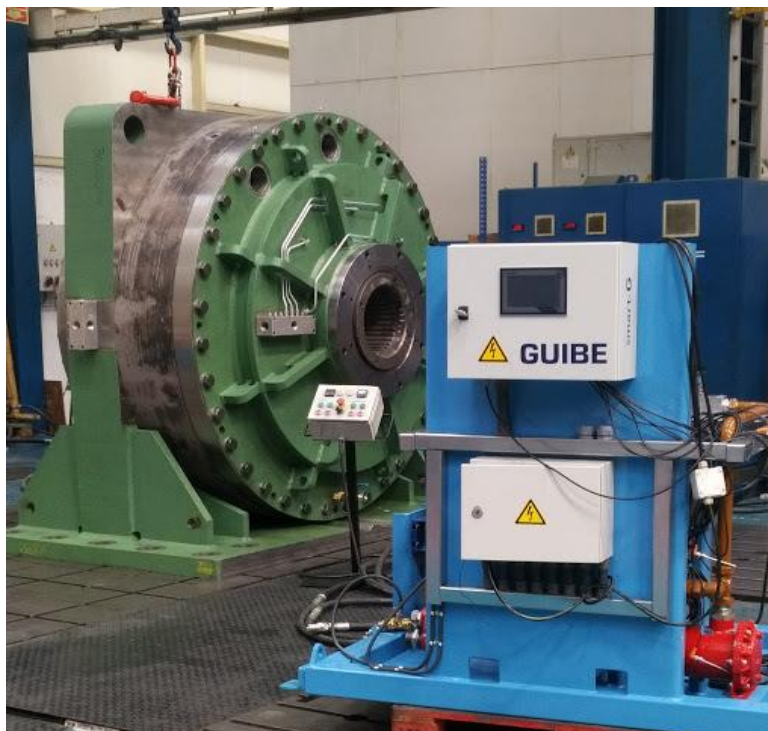
**Anexo 1. Reductor planetario (Guibe)**



**Anexo 2. Cople flexible con eslingas de poliéster**



### Anexo 3. Control electrónico para motor de 1000 kW y 6,3 kV



### Anexo 4. Tiempo perdido

ÁREA	FECHA	TIEMPO (h)	DESCRIPCIÓN DE LAS CAUSAS
Molino	01/02/2018	6.604	Partida base tensor lado derecho de raspadora primer molino y buje lado izquierdo
Molino	03/02/2018	1.17	Envasada maza bagacera (inferior) del primer molino
Molino	04/02/2018	0.5	Partido tensor de cadena de conductor intermedio N° 2
Molino	04/02/2018	0.55	Atoro 6to molino
Molino	04/02/2018	1.908	Quemado motor de breaker de fuerza del molino N° 2

ÁREA	FECHA	TIEMPO (H)	DESCRIPCIÓN DE LAS CAUSAS
Molino	07/02/2018	0.5	Atoro en 6to molino
Molino	07/02/2018	0.5	Falta de agua de imbibición
Molino	08/02/2018	4.375	Cambiando motor 630 KV 900 rpm Molino N° 3 (trabado coopling del reductor)
Molino	09/02/2018	0.5	Atoro en 6to molino
Molino	10/02/2018	0.25	Disparo conductor intermedio N°3
Molino	10/02/2018	0.673	Atoro en 6to molino
Molino	10/02/2018	2	Disparo conductor intermedio N° 4
Molino	11/02/2018	0.172	Partido tornillo de la babosa del colador rotatorio N° 2
Molino	11/02/2018	0.58	Atoro en 6to molino
Molino	11/02/2018	0.647	Disparo esterilla de la tolva
Molino	11/02/2018	0.5	Atoro en 6to molino
Molino	11/02/2018	0.412	Atoro en la tolva
Molino	11/02/2018	1.154	Disparo 5to Molino por sobre voltaje
Molino	11/02/2018	1.33	Disparo colador rotatorio y rastrillo de bagacillo
Molino	15/02/2018	0.33	Atoro en 6to molino

Molino	16/02/2018	3	Cambiando motor de esterilla de Atoro en el 6to molino alimentación a la tolva y ajuste del variador de frecuencia
Molino	16/02/2018	0.25	Atoro en el 6to molino
Molino	17/02/2018	3.323	Cambiando maza superior y cooping flexible 6to molino
Molino	18/02/2018	0.17	Atoro de la tolva
Molino	18/02/2018	0.25	Disparo eléctrico del motor de la esterilla por sobre carga
Molino	19/02/2018	0.25	Atoro en el 6to molino
Molino	20/02/2018	0.606	Atoro en la tolva
Molino	21/02/2018	0.17	Atoro en el 6to molino
Molino	21/02/2018	2.93	Atoro conductor intermedio N°1 por disparo motor intermedio N° 3
Molino	23/02/2018	0.243	Disparada esterilla de la tolva
Molino	24/02/2018	0.17	Torcida eslinga acoplamiento reductor planetario Molino N° 6
Molino	24/02/2018	0.17	Atoro de la tolva
Molino	25/02/2018	0.5	Atoro en el 4to molino
Molino	25/02/2018	0.25	Disparo del conductor intermedio N°3
Molino	25/02/2018	0.17	Atoro de la Tolva

Molino	26/02/2018	0.283	Rotura en reductor de la esterilla alimentadora
Molino	26/02/2018	6	Partido eje de entrada a la esterilla de la tolva
Molino	27/02/2018	0.5	Atoro de la tolva
Molino	27/02/2018	0.25	Atoro en el 4to molino
Molino	28/02/2018	2.654	Idas 4 tabillas en conductor intermedio N°4 por déficit de tornillos de acero inoxidable 5/8 x1 1/4 y tuercas auto frenable