UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis del consumo de energía en el proceso de molida de la caña de azúcar.

Autor: Irma Teoslia Mesa Fleites
Tutor: Dr.C Eusebio E. Pérez Castellanos
Año: 5to

Curso: 2016-2017

DEDICATORIA

A mi abuela, que, aunque no está hoy aquí ha estado siempre junto a mí en este recorrido.

A mis padres que más allá de las palabras, de los gestos y de todo lo que me han brindado, su amor no tiene límites, es único e irreemplazable, gracias por su apoyo.

A mis hermanos, sobrinos y cuñada que me han brindado su apoyo incondicional.

A mis primas Mercy y Jeniffer, a ustedes que han estado ahí para mí, mi hermana chica, mi amiga, quiero que sepas que no se trata de ser inseparables, sino de estar separadas y que nada cambie.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor el Dr.C Eusebio Pérez Castellanos por su contribución y asesoría en la realización de este trabajo de diploma, por la paciencia y el cariño brindado.

A mi familia que ha vivido el día a día junto a mí, a ella que se sumó a este barco y me han apoyado de todas las maneras posibles.

A mis amigos que son un tesoro que ha adquirido valor con el tiempo.

Gracias a Betsy, Nani y toda su familia que son parte de la mía, que me han aguantado en las buenas y en las malas.

A la familia Yanes Leal, la familia no siempre es de sangre, la familia son las personas que te quieren en la suya, que te aceptan por quien eres, gracias por soportarme a toda hora.

A todas mis amistades de Banao que son una gran familia para mí, a ellos que han aguantado todas mis locuras y mis arrebatos.

Algunas personas llegan a nuestra vida como bendiciones y otras llegan como lecciones, llegaste en el momento justo para estar ahí apoyándonos y brindándonos toda tu sabiduría incondicionalmente, gracias Lidia por querernos como tus hijos.

A Helen, Yasser, Roberto, Yuliet, Laiss, Yanara y Haidee, a ellos que estuvieron en este camino conmigo y a sus familias, gracias por hacerme parte de sus vidas.

A todos los amigos que he hecho a lo largo de estos años y a todos los profesores que contribuyeron en mi desarrollo como profesional, Gracias.

Resumen.

En el presente trabajo se desarrolla un análisis de los principales elementos que intervienen en el consumo de energía en un tándem de molinos de caña de azúcar, tomando como base las recomendaciones del Manual de Planta Moledora, el Hugot y el trabajo del Dr. Eusebio Pérez Castellanos. En el mismo se tienen en cuenta los elementos que se han desarrollado en varios trabajos que han trabajado el tema, pero se añaden nuevos elementos que hacen posible el trabajo de molida y que también influyen en el consumo específico de energía, tales como las cuchillas preparadoras, desfibradoras y los niveladores entre otros. Una vez que se obtuvo una metodología para desarrollar el cálculo se montó la misma en hojas de cálculo Excel. A modo de validación del trabajo se tomaron datos del tándem de la UEB azucarera Ifraín Alfonso en la presente zafra. En este central se ha desarrollado un sistema similar pero basado en el método de la Farrell y en los criterios del ingeniero Barreiro. Los resultados de la comparación de los valores reales con los recomendados por la metodología aplicada en el trabajo son satisfactorios.

Abstract.

Presently work is developed an analysis of the main elements that have some influence in the energy consumption in a tandem of mills of cane of sugar about the considerations of the recommendations of the Manual of Plant Moledora, the text of Hugot and the work of Dr. Eusebio Pérez Castellanos. In the same one they are kept in mind the elements that have been developed in several works that have worked the topic, but new elements are added that make possible the work milling and that they also influence in the specific consumption of energy, such as the crushers, shredding and the levelers among other. Once a methodology was obtained to develop the calculation it was mounted in calculation pages Excel. In order to validate of the work they took data of the tandem of sugar UEB Ifraín Alfonso in the present harvest. In this factory one a similar system has been developed but based on the method of Farrell and in the engineer's approaches Barreiro. The results of the comparison between the real values with those recommended by the methodology applied in the work are satisfactory.

Índice.

Introducción. 6
Capítulo 1: Tendencias actuales en el mundo en el estudio del consumo de energía en la molida de caña. Estado del arte. 10
Conclusiones parciales 15
Capítulo 2: Expresiones empleadas para calcular el consumo de energía en la molida. 16
2.1 Factores que intervienen en el consumo de potencia en un molino. 16
2.2 Otros factores a tener en cuenta en el consumo de potencia en el molino. 18
2.3 Consideraciones sobre la preparación de la caña. 21
2.4. Expresiones para el cálculo de la potencia que consume un molino. 22
2.4.1. Método de la Farrell utilizado por los técnicos del MINAZ .Citado en [27]. 23
2.4.2. Fórmula de Barreiro. 24
2.4.3. Expresiones de Hugot para el cálculo de la potencia consumida en los molinos. 25
2.4.4 Ecuación empleada por el Dr. Eusebio Pérez para el cálculo de la demanda de potencia. 30
2.5 Eficiencia mecánica en la molida. 31
2.5.1 Eficiencia de la transmisión. 32
2.5.2. Otras pérdidas mecánicas. 34
Conclusiones del capítulo. 34
Capítulo 3: Cálculo del proceso y análisis de caso. 35
3.1 Método de cálculo empleado. 36
3.2 Descripción del tándem objeto de estudio 37
3.2.1 Descripción del central. 37
3.2.2. Ejemplo de cálculo 41
3.3 Comparación de ambos métodos. 43
3.4 Gráfico comparativo del consumo de potencia por cada método 43
Conclusiones parciales. 43
Conclusiones. 44
Recomendaciones. 45
Bibliografía. 48
Anexos. 52

Introducción.

El desarrollo de la industria azucarera cubana fue muy lento en sus dos primeros siglos y comenzó su despegue a partir de la segunda mitad del siglo XVIII. En la segunda mitad del siglo XIX se produjo la introducción de máquinas de vapor de alta presión para mover los trapiches cubanos. En 1860 se introdujo en el Ingenio “Las Cañas” una máquina de vapor de alta presión procedente de los Estados Unidos, con vistas a mover el trapiche, que era el más moderno del país en esa época. Esta instalación fue visitada en 1863 por Álvaro Reynoso: el hombre que inculcó en los cubanos el amor por la investigación alrededor de la caña de azúcar [11].

En el primer cuarto del siglo XX se produjeron enormes inversiones de capital norteamericano en la producción de azúcar en el país y se montaron la mayor parte de los colosos que poseyeron las compañías yanquis en la isla. En 1925 se sobrepasaron por primera vez los cinco millones de toneladas de azúcar (téngase en cuenta que la producción en 1896 no sobrepasó las 230 000 toneladas) A partir de 1930 las inversiones yanquis se trasladan a otras ramas de la economía y se estanca la producción [2].

Con el triunfo de la Revolución se produjo una reacción violenta del gobierno de los Estados Unidos y el 3 de julio de 1960 se arrebata a Cuba la cuota que poseía en el mercado norteamericano, que llegó a alcanzar unos tres millones de toneladas anuales. El 6 de agosto de ese mismo año el Gobierno Revolucionario nacionalizó un numeroso grupo de grandes empresas y entre ellas una buena cantidad de centrales azucareros pertenecientes a compañías que en la mayoría de los casos tenían sus oficinas en Wall Street.

A partir de 1990 comenzaron a soplar funestos aires contra la producción azucarera cubana. La desaparición del campo socialista y la desintegración de la URSS significaron un duro golpe para todos los renglones de economía y en particular el azucarero. El gobierno yanqui recrudeció aún más su bloqueo y promulgó leyes que, como la Torricelly y la Helms-Burton, presionan a cualquier país que comercie con la isla y lo amenazan con sanciones del mercado interno.

La punta de lanza de la producción azucarera cubana debe radicar en el aumento de su eficiencia y en la diversificación de sus producciones, que son los dos elementos que pueden hacer competitiva a esta rama de la economía.

Estos elementos están contenidos en la tarea “Álvaro Reynoso”, en honor al eminente científico cubano. Uno de sus aspectos principales plantea la selección de 71 centrales

azucareros por sus condiciones técnicas y eficiencia, con áreas de caña de las mejores tierras, propias o agregadas, para alcanzar mayores rendimientos y costos competitivos, no superiores a 260 pesos (de ellos 60 en divisas) por toneladas de azúcar [36].

En este contexto pudiera parecer que las investigaciones azucareras se hacen ya innecesarias en Cuba, pero, por el contrario, puede afirmarse que son absolutamente imprescindibles en estos momentos si no se desea que dentro de algún tiempo sea necesario cerrar todas las fábricas e importar azúcar.

Por otra parte, se está produciendo a nivel global una situación crítica con los combustibles convencionales. En los próximos 20 años la demanda mundial de energía se multiplicará por tres mientras disminuirá la contribución de los combustibles fósiles como fuente principal de producción eléctrica [6]. Todos estos aspectos que se han planteado fundamentan la necesidad de las investigaciones en el campo del ahorro de energía en la molida de caña de azúcar.

La disminución del costo por tonelada de caña molida tendrá que ser necesariamente conseguida a través de un aumento en la eficiencia mecánica del molino como equipo o a través de un mayor aprovechamiento de la capacidad de molida.

Se hace necesario que las personas responsabilizadas con la molida estén dotadas de una herramienta que les permita prever los cambios que se produzcan, adaptarse a las nuevas condiciones y tomar iniciativas que hagan competitiva la industria.

En Cuba la principal fuente de energía renovable es la biomasa, ya que no existen grandes ríos, ni zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes que tienen importancia en el orden local o que su aprovechamiento resulta conveniente desde el punto de vista medio ambiental. Este es el caso de los bosques naturales y las plantaciones energéticas en desarrollo, los residuos agroindustriales y los urbanos.

La utilización de estas fuentes en la generación de electricidad está muy vinculada al desarrollo de tecnologías eficientes que permitan que esta producción sea competitiva con el uso de los combustibles convencionales en las condiciones específicas de los países en desarrollo. En esta dirección se trabaja intensamente, por lo que es necesaria la realización de proyectos demostrativos que faciliten la transferencia y evaluación de éstas en las condiciones de los países de menor desarrollo [9].

A lo largo de los años se ha analizado detenidamente la conveniencia y factibilidad de introducir cambios tecnológicos en el sector de la agroindustria azucarera para aprovechar de manera eficiente la biomasa cañera.

La reducción continua de las producciones cañera y azucarera después de 1993 incidió de forma negativa en la posibilidad de introducir esos cambios tecnológicos en la agroindustria, a pesar de numerosos estudios de oportunidad y factibilidad exitosos que confirmaron las ventajas de la biomasa cañera para sustituir petróleo en la generación de electricidad.

Por otra parte, el Equipo Nacional para la Mitigación del Cambio Climático también realizó estudios en los que se propuso emplear de manera intensiva la biomasa cañera y se analizaron sus ventajas con un enfoque más integral desde los puntos de vista ambiental, económico, financiero, tecnológico y otros, que ilustran los beneficios obtenidos al sustituir con biomasa cañera el petróleo crudo cubano, utilizado entonces para generar casi 100% de la energía eléctrica que consumía el país.

Entre los años 2002 y 2005 se orientó la realización de dos redimensionamientos sucesivos sin despedir un solo trabajador agrícola ni industrial, reduciendo los 156 ingenios que poseía Cuba en 1990 hasta alrededor de 60, mientras la fabricación de azúcar disminuyó desde los más de siete millones de toneladas métricas (t) obtenidas en la primera parte de la década de los 90 obtenidas hasta cerca de un millón de toneladas en la zafra que terminó a principios de 2005 —y, al mismo tiempo, la producción de caña también se redujo desde más de setenta millones de toneladas hasta menos de veinte millones en igual período.

El programa de AZCUBA consiste en poner en marcha desde 2015 hasta 2030 no menos de 765 megavatios en 19 plantas bioeléctricas, tanto anexo a centrales azucareros o con remodelación de la base energética existente. Los ingenios molerán durante (150 – 180) días/año, a no menos del 85% de su capacidad.

Actualmente el país negocia el montaje de tres bioeléctricas situadas en los ingenios Jesús Rabí, Ciro Redondo y 5 de Septiembre, la primera en el occidente y las otras dos en la zona central, las cuales pueden aportar conjuntamente unos 140 megavatios. La industria azucarera cubana, con una generación total de 626 gigavatios/hora, aporta hoy el 86% de la energía suministrada por las fuentes renovables en esta isla. El 14% restante corresponde a la eólica, fotovoltaica, hidroenergía y solar térmica [38].

El primer proyecto de energía renovable en Cuba está finalmente en construcción gracias a la decisión de la compañía Shanghái Electric de China de invertir con una empresa británica que preparó las bases para el programa.

Su enfoque para financiar los proyectos, utilizando la caña de azúcar, la producción de bagazo y el marabú local que crece rápidamente, refleja el esfuerzo más amplio que

enfrenta Cuba en su intento por desarrollar el sector de las energías renovables y superar un déficit energético crónico.

La construcción de la planta inicial de 62 megavatios en Ciro Redondo, en la provincia central de Ciego de Ávila, se pondrá en marcha en el 2019 y es equivalente a la producción de energía en un año del contenido de un tanquero lleno de crudo.

El potencial energético de Cuba es enorme ya que la isla cuenta con abundante sol, viento y biomasa. Pero su desarrollo sólo se ha convertido en una prioridad estatal en el último año desde que Venezuela, un aliado que atraviesa una crisis, redujo sus envíos de crudo subsidiado a la isla [12].

Problema científico:

Es necesario disminuir el consumo de energía que se produce en la molida y otras operaciones anexas con vistas a entregar al SEN una mayor cantidad de electricidad de la que se genera a partir de la biomasa cañera.

Hipótesis:

Si se incrementa la eficiencia en el proceso de molida de caña en el ingenio se aumentarán las posibilidades de aumentar la entrega de energía eléctrica al SEN.

Objeto de estudio:

El objeto de estudio de este trabajo es el consumo de energía en molinos de caña, tanto desde el punto de vista de su valor absoluto como en su relación con la caña molida así como la eficiencia mecánica de estos equipos.

Objetivo general:

Realizar un estudio sobre el consumo de energía en los molinos de caña, con vista a determinar los factores que influyen en la disminución del mismo mediante el uso de herramientas informáticas.

Para dar cumplimiento a este objetivo general se proponen los siguientes

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda sobre el estado del arte del consumo de potencia de los molinos de caña de azúcar.
2. Analizar los factores que intervienen en el consumo de energía en la preparación de la caña para su molida y en el proceso de extracción de jugo.
3. Aplicar las expresiones de cálculo en un central del territorio.

Capítulo 1: Tendencias actuales en el mundo en el estudio del consumo de energía en la molida de caña. Estado del arte.

El estudio del consumo de energía en el proceso de molida de la caña ha ocupado la actividad de los técnicos azucareros desde los mismos inicios de la producción de azúcar a partir de la caña, pero ha sido particularmente atendido en las últimas décadas, a partir de la situación energética y medioambiental que se viene presentando.

En Cuba se desarrollaron trabajos de importancia, que fueron canalizados a través de la ATAC:

Mayo [24] planteó un aumento significativo del consumo específico de potencia (HP/100@ de caña) cuando se aumentaba la capacidad en un 25 %. En este sentido ha podido comprobarse posteriormente que cuando los aumentos de capacidad son discretos y lógicos se obtiene más bien una disminución del consumo específico [9, 10]. Recomendó que sería conveniente aumentar la velocidad sobre la base de aumentar el diámetro de las mazas ya que con esto aumenta el período de compresión del bagazo.

Un trabajo muy importante fue publicado por Tromp [41], el cual señaló la no uniformidad que existía en aquella época para el cálculo de los ajustes o aberturas en el molino y que los errores cometidos en el cálculo se subsanaban muchas veces con aumentos de las presiones con lo que aumentaban el desgaste y las roturas –pudiera decirse también el consumo de potencia-.

Chinchilla Varona [8] desarrolló un trabajo muy interesante en el cual destacó que aunque el consumo de potencia aumentaba con la velocidad, no lo hacía de una forma lineal, también estableció curvas para medir el consumo de potencia en función de la velocidad y desarrolló las mediciones en tres condiciones: en vacío, con el colchón de bagazo atravesando el molino, pero sin presión aplicada y en una molida normal. Para una molida de 21,72 t (1890 @) de fibra/hora, con 95 % de extracción, 180 % de agua de imbibición con relación a la fibra, en un sexto molino, con 3914 kN de fuerza hidráulica total y para una velocidad lineal de 0,254 m/s (50 pies/min) reportó valores de 1,03 kWh/@ de caña (equivalentes a 89,6 kWh/t de fibra). Este valor es muy elevado aún para un tándem completo por lo que puede existir algún error en ese sentido.

Este mismo autor [7] supuso la eficiencia mecánica del molino en un 35 %, utilizando valores estimados , de acuerdo con ecuaciones deducidas para un molino dado, de igual forma estimó las pérdidas debidas a diferentes factores. De nuevo este autor trabajó en condiciones muy particulares y con ecuaciones empíricas.

En los años sesenta del siglo XX se produjeron varias publicaciones de importancia en lo que se refiere a textos de gran utilidad para la docencia como el Hugot, y el Jenkin, así como el Texto de Murry y Holt que se publicó y en Cuba, el Índice de Capacidades.

A partir de la década de los 90 surgieron muchos trabajos en revistas y eventos científicos de los cuales se brinda a continuación una panorámica general:

Una tendencia muy utilizada en las últimas décadas ha sido la de medir el torque en distintos puntos de la transmisión y, con el valor de este torque y la velocidad angular, calcular el consumo de potencia. Un trabajo muy completo en este sentido fue presentado por Jenkin [19] también han trabajado en este sentido Argüelles [1] y Riera [35].

Pérez [29] desarrolló un análisis de las expresiones que se emplean en Cuba para determinar el consumo de potencia en los molinos y estableció comparaciones entre sus resultados teóricos.

Ramanriskina y otros [33] enumeraron el desarrollo reciente en los molinos de caña en relación con su potencial para el ahorro de energía y mejoras en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto. Plantearon que el molino autoajustable o molino de relación constante ha sufrido una serie de modificaciones desde su introducción en 1963. No se señalaron valores numéricos en el ahorro de energía por la introducción de este de este tipo de molinos.

Lebrón [21] analizó la conversión de un molino de tres a cuatro mazas, señalando que este principio se originó en Sudáfrica en fecha tan temprana como 1960, para complementar la tolva vertical cerrada (Donnelly) de alimentación.

En la industria azucarera de USA la cuarta maza fue usada por primera vez por los productores de azúcar de Valle del Río Grande en 1978. En este trabajo se presentó un procedimiento para la incorporación de la misma y los equipos inherentes como guía para los ingenieros, con énfasis en las modificaciones de la virgen, lo cual puede afectar sensiblemente el consumo general de potencia pero no se menciona en este trabajo.

Un aspecto muy importante que se relaciona con el objeto de estudio de este trabajo es la instalación de tolvas Donnelly ya que en varios textos [28 y 15] se plantean aumentos de la capacidad de molida sin aumentar sensiblemente el consumo de potencia en esta operación.

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.

Con esa potencia instalada podrán producirse 7 mil 316 GWh, sustituyendo un millón 75 mil toneladas de combustible al año, que implicará una considerable reducción de las emisiones de CO2 a la atmósfera y con ello de la carga contaminante del medio ambiente, informó Argelia Balboa, especialista en energías renovables del Ministerio de Energía y Minas.

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.

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 CO2.

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.

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.

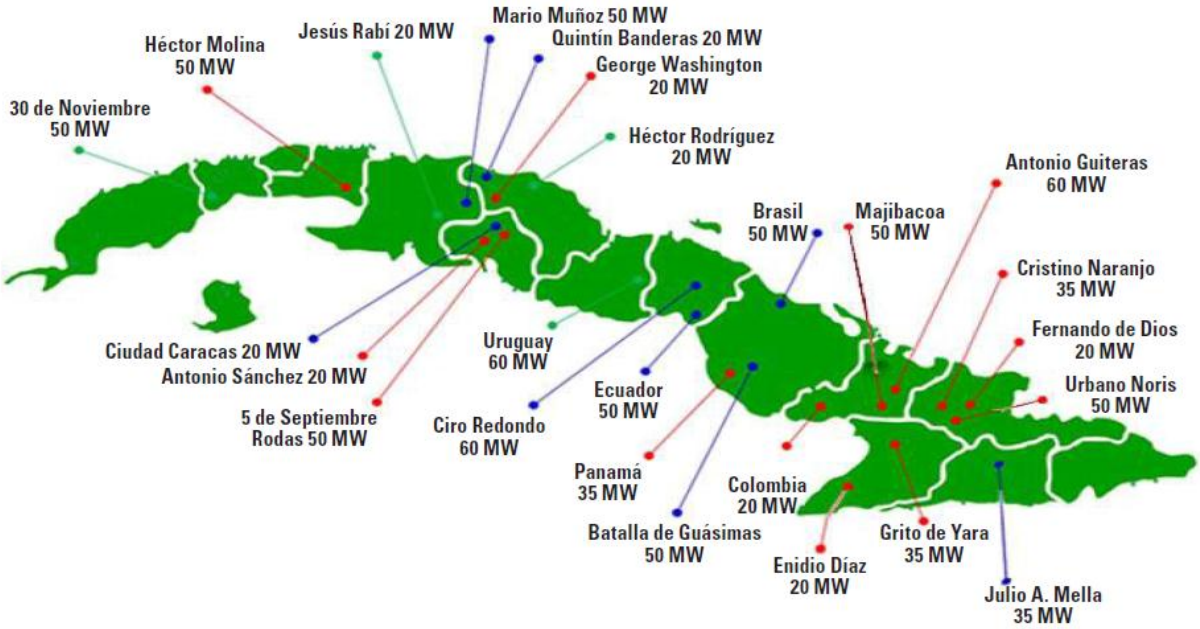


Figura 1.1 Ubicación de los centrales azucareros de las 25 bioeléctricas que se proponen construir hasta el 2030,las cuales estan en distintas fases de construccion, negociacion o en la cartera de oportunidades.

Actualmente la generación de electricidad a partir de la biomasa cañera aporta las mayores cantidades entre todas las fuentes renovables que se emplean en el país.

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_2 anuales. [32]

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.

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 CO2, minimizando el impacto de la contaminación ambiental.

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 2º, 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.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, alcanzar el 36 % de generación a nivel global supondría un crecimiento económico de 1,1 % ese año, el 3,7 % del incremento del bienestar, y el empleo de hasta 24 millones de personas en el sector contra los 9 millones actuales.

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 rebasa los 120 días en el país, las fábricas de azúcar se autoabastecen de electricidad y entregan sus excedentes al Sistema Eléctrico.

Conclusiones parciales.

- Es innegable la importancia que revisten las investigaciones sobre la generación de electricidad a partir de la biomasa cañera, pero tanta importancia como este aspecto lo tiene el hecho de investigar la disminución del consumo de energía dentro de las fábricas de azúcar.

- Existe una gran cantidad de bibliografía sobre el tema de la extracción y sobre el consumo de potencia en la molida de caña, en este trabajo se han reseñado las más importantes desde ambos puntos de vista. Con relación a la extracción se resalta la importancia de una buena dosificación de la maceración y la imbibición en el proceso de disminución de la Pol en bagazo y se alerta sobre los peligros que se corren cuando no existe un buen control de estas variables.

Capítulo 2: Expresiones empleadas para calcular el consumo de energía en la molida.

Un molino consiste esencialmente de tres cilindros horizontales llamados mazas, que comprimen la caña que pasa entre ellos para extraerles el jugo. Las mazas se colocan formando un triángulo isósceles dentro de una estructura de acero llamada virgen. La maza colocada en la parte superior del triángulo se denomina “superior” y las otras dos, que están situadas en un plano inferior, “cañera” y “bagacera”. Las mazas constan de un eje central de acero, el guijo, sobre el que se coloca por ajuste prensado un tambor de hierro fundido [3]. La cuarta maza es para ayudar a la alimentación del molino [17]. El ajuste de los molinos depende de la razón de molida diaria y de la magnitud de la preparación previa que tenga la caña [19]. El proceso de extracción de la sacarosa de la caña de azúcar, se consigue comprimiendo la caña entre las mazas con la ayuda de la presión hidráulica y del sistema de imbibición [17]. Dentro del molino el bagazo pasa sobre un puente, la cuchilla central, en su paso desde la compresión entre la maza superior y la maza cañera hasta la compresión entre la maza superior y la maza bagacera. Otros componentes son el sistema para el movimiento de las mazas y el sistema de lubricación [3].

2.1 Factores que intervienen en el consumo de potencia en un molino.

El análisis más completo que se ha desarrollado en el sentido de los aspectos teóricos que intervienen en el consumo de potencia de un molino aparece en el Manual de Planta Moledora [28], que amplió los conceptos ya vertidos por un grupo de prestigiosos técnicos. En el manual se dividieron los factores que inciden en el consumo de potencia de un molino en externos e internos.

Entre los externos se destacó la preparación de la caña, la razón de molida y la composición de la materia prima.

En cuanto a la preparación de la caña se resaltó que la potencia requerida por un molino depende del grado de preparación que haya sufrido el colchón antes de entrar al molino, se destaca que la potencia empleada en preparación se recupera en el resto del tándem y se plantea que en este sentido los requerimientos de potencia de todos los molinos son los mismos con excepción de los primeros.

En cuanto a la razón de molida se expresó que sus variaciones tienen muy poca influencia en el consumo de potencia.

A la composición de la materia prima se le prestó en este texto una importancia capital pues se señala que se han obtenido variaciones de hasta un 25 % en el consumo de potencia solamente al moler caña de diferentes variedades.

Con este planteamiento y el relacionado con la fibra pudiera pensarse que en la expresión del consumo de potencia que recomienda dicho texto se debían tener en cuenta estos aspectos o, al menos, el % de fibra y, como se verá más adelante no ocurre así.

Para los factores internos se planteó la siguiente enumeración:

- **Compresión del bagazo**. Se plantea que este factor es a su vez influido por: la presión hidráulica, la velocidad tangencial de las mazas, la insuficiente capacidad en el drenaje de las mazas y las flotaciones de la maza superior.
- **Fricción entre los collarines de los guijos y las chumaceras.** A este factor se le atribuyen influencias de la presión hidráulica, la velocidad, el área de contacto entre los cojinetes y los collarines.
- **Fricción entre el bagazo y la cuchilla central.** Con relación a este factor se plantea que está influido por la presión hidráulica, la velocidad tangencial de la maza superior, y la posición y configuración de la cuchilla.
- **Fricción entre las mazas, la cuchilla central, así como con los raspadores.** Sobre este factor se plantea que tienen influencia la velocidad de las mazas y la calidad del maquinado de los elementos raspadores. De nuevo aquí debe influir la longitud de las mazas y esto tampoco se señala en el texto.
- **Movimiento de las mazas alimentadora**. Este es el único texto donde se ha mencionado este aspecto, aunque después no se toma en cuenta en la expresión que se emplea para el cálculo.
- **Fricción y contacto entre engranajes y coronas**. Aquí se consideran teóricamente las influencias de la eficiencia de la transmisión por engranes y coronas y la fricción en los cojinetes de la transmisión. El aspecto relacionado con las coronas fue estudiado con mucha profundidad en trabajos de doctorado de la UCLV y se establecieron medidas para atenuar sus efectos.
- **Posición relativa de los acoplamientos, entredós y extremos cuadrados de los ejes que se unen.** Sobre este aspecto debe destacarse el análisis desarrollado por Campos [5].

Se ha destacado el enfoque del Manual de Planta Moledora por ser, como se ha dicho anteriormente uno de los más completos que se han publicado al respecto. Quizás

pudieran añadirse otros factores tales como la fricción entre las mitades superiores de las chumaceras de las mazas superiores y las quijadas de las vírgenes.

2.2 Otros factores a tener en cuenta en el consumo de potencia en el molino.

Existen otros factores que no se han tenido en cuenta por los distintos autores que han analizado el consumo de potencia de un molino y que, dada la tendencia actual en Cuba y en el mundo, es necesario analizar.

- **Aumento en el diámetro de las mazas.**

Esta tendencia ha adquirido un auge mayor en las dos últimas décadas. Una maza de mayor diámetro permite aumentar la extracción, la capacidad de molida o ambas a la vez ya que, aunque no se aumente la velocidad angular, si se aumenta el diámetro de las mazas aumenta la velocidad tangencial.

- **Aumento en el paso y variación en el ángulo del rayado de las mazas.**

Sobre este aspecto en criterios actuales de la industria azucarera cubana [26] se plantea que se han tenido aumentos tan grandes en el consumo de potencia al aumentar el paso del rayado que el equipo motriz no ha podido con la carga que se le ha asignado.

Las causas de este fenómeno, que es absolutamente real, se expresan en el aumento de la capacidad de molida y del índice de preparación que se produce sobre la materia que se muele cuando se emplean rayados más gruesos. Se plantea que los rayados gruesos son los que aumentan los tres factores en un mayor grado.

Con relación a la preparación pueden explicarse estos resultados si se tiene en cuenta que uno de los principios básicos que se maneja en los equipos de preparación –cuchillas picadoras y desfibradoras – es la existencia de velocidades relativas entre los elementos a través de los cuales pasa el colchón. Con el rayado se logra que haya una diferencia de velocidades entre los puntos exteriores de una maza y los del fondo del rayado de la maza que conjuga con ella.

La capacidad de molida es una función del volumen de material que se procesa por unidad de tiempo y de la densidad de dicho material.

El volumen depende a su vez del ajuste entre las mazas y de la longitud de las mismas, así como de la velocidad tangencial de la maza.

En cuanto a la longitud de las mazas puede hablarse más bien de longitud efectiva de contacto entre la maza y el colchón y esta longitud efectiva depende del ángulo del rayado.

Cuando este ángulo es de 60 ^{0} la longitud efectiva se duplica si se compara con una maza lisa, tal y como se muestra en la figura 2.1, cuando los ángulos son más agudos aumenta más la longitud efectiva. En Cuba se emplean en la actualidad rayados que han disminuido hasta los 35^0, con lo que ese efecto se hace aún mayor. Al aumentar la longitud efectiva se puede disminuir el espesor de colchón y mejorar la extracción o aumentar la capacidad manteniendo el espesor de colchón, pero todos estos efectos beneficiosos sobre la potencialidad de funcionamiento del molino conllevan a un mayor trabajo sobre el colchón y, como se ha dicho anteriormente, esto requiere de un mayor consumo de potencia.

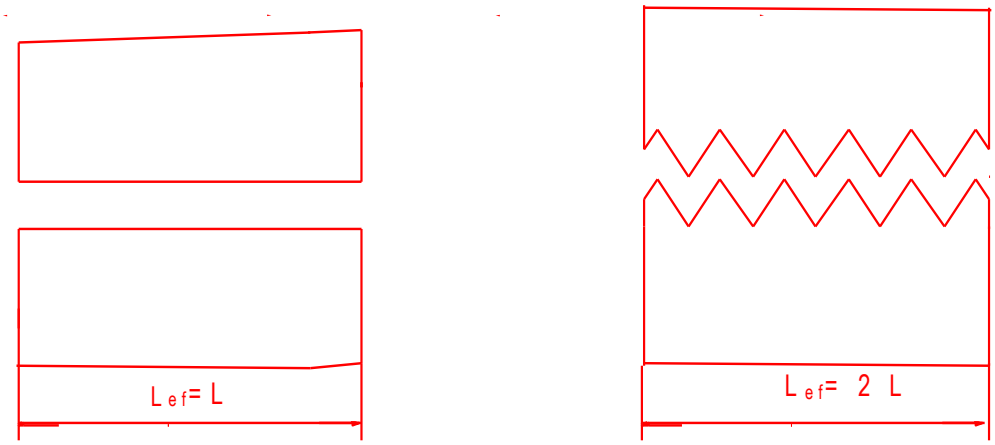


Figura 2.1. Longitud efectiva de contacto de la maza.

- **Instalación de la cuarta maza alimentadora.**

Las ventajas que se obtienen en el proceso de alimentación del molino con este cuarto cilindro son sustanciales. Su uso eliminó la necesidad de instalar conductores intermedios de alimentación forzada, con lo que la única función del conductor es la transportación de la caña. Con esta tendencia también surgió la de independizar el mando de los conductores intermedios desde el molino y los mismos fueron dotados de motores independientes. De hecho, la instalación de la cuarta maza alimentadora produjo una presión de alimentación en la garganta del molino que contribuyó radicalmente a erradicar los atoros. En la actualidad todos los tándems tienen instalada la cuarta maza. Las consideraciones que se desprenden del uso de la cuarta maza en cuanto al consumo de potencia del molino son importantes ya que el motor principal ya no le suministra energía al conductor intermedio, pero en cambio debe mover la maza alimentadora cuyo consumo de potencia no es despreciable. (Esquema)

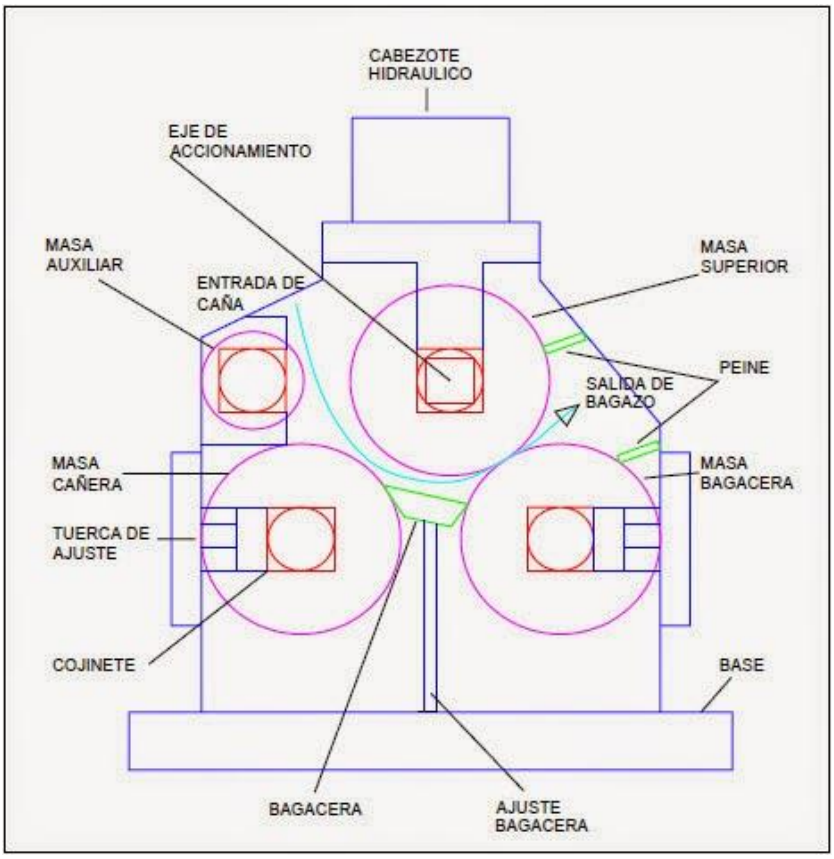


Figura 2.2 Esquema de la 4ta maza.

- **Tolvas Donnelly.**

Consiste en una tolva constituida fundamentalmente por dos chapas casi paralelas colocadas en la boca del molino y con una altura suficiente para que el bagazo origine una “columna de alimentación” en esa zona, específicamente entre la maza alimentadora y la superior. En el mundo estas tolvas han sido modificadas mediante la utilización de un control automático para la altura del colchón en las mismas.

En Cuba se ha colocado el aditamento esencialmente en el primer molino, aunque ya muchos centrales la han instalado también en el último molino e incluso en molinos intermedios, lo cual es la tendencia actual. En el mundo se reportan muchos casos de tándems que se han dotado de estas tolvas en todos los molinos. Para esto se ha tenido que modificar el sistema de manipulación del colchón de bagazo ya que en aquellos casos en que no existe suficiente separación entre un molino y otro es necesario instalar conductores de arrastre. Se reportan aumentos de hasta un 40 % en la capacidad de molida ya que se eliminan en su totalidad los problemas de alimentación de los molinos, sobre todo cuando la misma se ha combinado con la cuarta maza alimentadora en todas las unidades de molida.

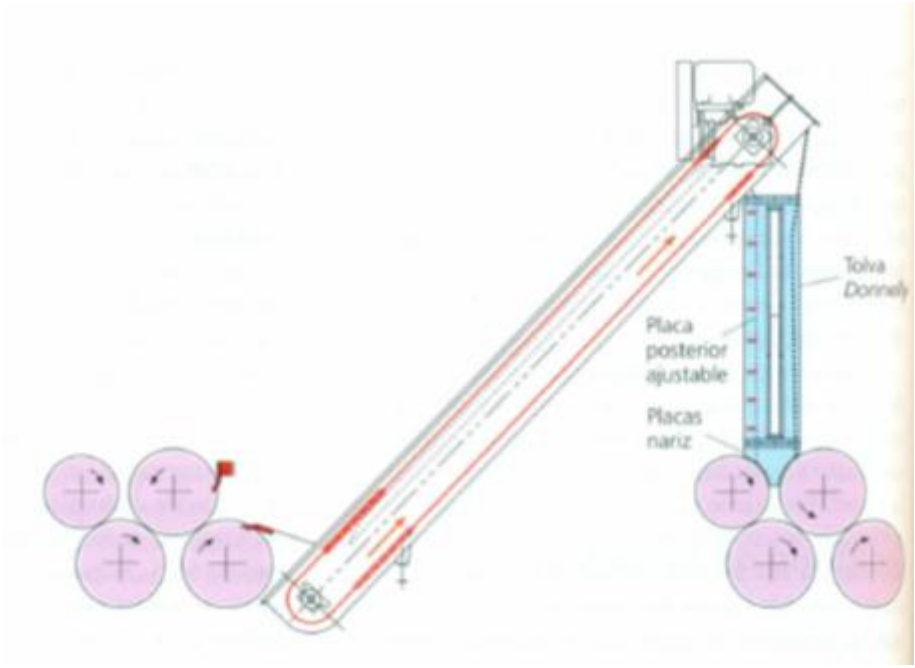


Figura 2.3 Cuarta maza para dirigir la alimentación desde una tolva Donnelly.

2.3 Consideraciones sobre la preparación de la caña.

Este es un factor que aún no ha sido analizado con toda la profundidad que se requiere, sobre todo por las dificultades que existen para medir esta preparación. Se ha planteado que era necesario lograr una mayor preparación del colchón y que todo lo que se gastara en preparación se ahorraría después en la molida. Esta es una tendencia adecuada, sobre todo en Cuba que prepara la caña con cuchillas y donde el índice de preparación es bajo en comparación con los países que emplean desfibradoras pesadas. Existen diversas tendencias como la de aumentar el ancho de corte de las cuchillas sin embargo la firma Fulton ha desarrollado un nuevo diseño de juegos de machetes con más filo que los anteriores y ha retomado los machetes oscilantes. Se ha argumentado por muchos operadores de calderas y del área de clarificación que las cuchillas con mucha área de corte desarrollan una preparación con un tamaño muy pequeño de las partículas de bagazo, lo que trae problemas de combustión en algunas calderas y de revoltura en clarificadores. De hecho, se conoce de centrales que han debido eliminar un juego de cuchillas en plena zafra debido a las caídas de presión en las calderas por un bajo rendimiento térmico del bagazo o a revolturas frecuentes en los clarificadores. El mencionado diseño de la Fulton argumenta una preparación con partículas de bagazo más finas, pero más largas, con lo cual plantean que se evitan los problemas anteriormente planteados. Los defensores de los grandes índices de preparación señalan que si se

adaptan los generadores de vapor y los sistemas de separación de sólidos a estos regímenes de preparación se pueden obtener mejores resultados.

Otros factores a tener en cuenta en el consumo de energía que se produce en el proceso de molida.

- Desfibradoras (Anexo 1)

Constituida por molinos a martillos que están colocados radialmente en un solo eje. Preparan a la fibra en forma de hebras largas rompiendo la capa cerosa dejando así la fibra expuesta.

El uso de desfibradoras, permite mejorar la uniformidad de la alimentación de los molinos, asegurando un aumento de la capacidad del trapiche y en la extracción de la sacarosa, y reduciendo por otro lado, la pérdida de sacarosa en el bagazo.

- Niveladores (Anexo 2 y 3)

Se encuentra en la conductora principal. Acomoda y nivela los montículos de caña. Gira rápidamente, pero no ayuda a avanzar a la caña, puesto que gira en sentido contrario al avance de la misma.

- Cuchillas picadoras de caña

Estas máquinas están provistas de cuchillas giratorias movidas por turbinas o motores eléctricos, que cortan los tallos y los convierten en astillas, también consta de una desfibradora como preparación para separar el jugo. Tanto las cuchillas como la desfibradora pueden variar la velocidad de alimentación de tal forma que esté en coordinación con la capacidad de recuperación de la fábrica.

- Desmenuzadora

Es un molino de 2 cilindros, con dientes (chevrones), en forma de V, que al girar agarran mejor a la caña. Este tallado sirve para que el rodillo tome con fuerza y desmenuce la caña. Tiene superficie rugosa y tallada radialmente. Su velocidad es aprox. 30% mayor que los molinos. La desmenuzadora consume menos potencia (2/3 menos) que un molino. De la desmenuzadora se obtiene jugo primario, que tiene aprox. 16° Brix y es el jugo que se utiliza para pagar al cañero. Actualmente su uso está casi erradicado en Cuba.

2.4 Expresiones para el cálculo de la potencia que consume un molino.

NOTA: en esta parte del trabajo se citarán las expresiones correspondientes al Sistema Internacional. En el caso de la Fuerza Hidráulica Total, este parámetro se señala

erróneamente en algunos textos en toneladas cortas o en toneladas métricas. En este caso los autores suponen la tonelada corta como una fuerza equivalente a 2000 libras-fuerza, o sea 8,896 kN y la tonelada métrica como una fuerza equivalente a 1000 kg fuerza, o sea, 9,807 kN.

2.4.1 Método de la Farrell utilizado por los técnicos del MINAZ .Citado en [27].

La Farrell publicó gráficos de los cuales los técnicos del MINAZ obtuvieron en 1966 la siguiente expresión:

$$[N = 147.\ K\ .V + 4{,}1.t_f\ ] \qquad \text{(II.1)}$$

donde:

N – Potencia consumida por el molino, en HP [kW].

K – constante que depende de la longitud de las mazas y de la presión lineal y para la cual se recomendaron los siguientes valores:

K = 8 para molinos de 7 pies [2,13 m] con presión lineal de 80 ton/pie [2340 kN/m].

K = 7 para molinos de 6,5 pies [1,98 m] con presiones de 78 ton/pie [2280 kN/m].

K = 6,5 para molinos de 6 [1,83 m] pies con presiones de 78 ton/pie [2280 kN/m].

En todos los casos se refería a toneladas cortas de fuerza y pies de longitud de masa. .

V – velocidad periférica de las mazas en pies/min [m/s]

t_f - toneladas cortas [toneladas métricas] de fibra /hora

Si la presión es de 67 ton/pie [1959 kN/m] se multiplicaría el valor de K por 0,90, en caso de disminuir el valor de la presión a 55 ton/pie [1608 kN/m] el coeficiente de reducción sería de 0,81 y cuando la presión se redujera a 48 ton/pie [1404kN/m] se tomaría un factor de reducción de 0,70.

Es de notar que en esta expresión se comete un error que era frecuente en los años sesenta y es que se expresan las unidades de fuerza en toneladas y el flujo en las mismas unidades.

Este método de cálculo de potencia, muy práctico y rápido, reducía, las variables que afectan el consumo de potencia a la presión lineal sobre las mazas, la fibra procesada por unidad de tiempo y la velocidad. Si bien en su momento puede haber brindado datos más o menos precisos, en la actualidad pudiera presentar imprecisiones importantes en los valores estimados.

2.4.2 Fórmula de Barreiro.

El ingeniero José Barreiro dedujo una expresión para calcular la potencia indicada en molinos de caña, la cual apareció en dos publicaciones muy útiles que desarrolló el MINAZ [26,28]. La misma plantea lo siguiente:

$$\left[N = \frac{K.P^{0,675}}{96,33.V^{2,822}}\right] \qquad \text{(II.2)}$$

$$N = \frac{K.V^{1,219}.P^{0.918}}{71,888}$$

$$N = \frac{K.V^{\frac{1,219\ln 196,8.V}{\ln V}}.P^{\frac{0,918.\ln 0,1124P}{\ln P}}}{96,33}$$

donde:

N –Potencia en el equipo motriz en HP [kW].

K - factor de corteza, que depende del molino de que se trate.

K = 1,1 a 1,2 si se trata de una desmenuzadora de dos mazas precedida por un juego de cuchillas.

K = 0,9 a 1,1 si se trata de una desmenuzadora de dos mazas precedida por dos cuchillas.

K = 1,8 a 2,0 para una desmenuzadora de tres mazas precedida por un juego de cuchillas.

K = 1,5 a 1,8 para una desmenuzadora de tres mazas precedida por dos juegos de cuchillas.

K = 1,25 para un primer molino precedido de una cuchilla y una desmenuzadora.

K = 1,15 para un primer molino precedido de dos cuchillas y una desmenuzadora.

K = 1 para los otros molinos si el primero está precedido por dos cuchillas y una desmenuzadora.

En esta relación no aparece el caso de un primer molino precedido por dos juegos de cuchillas pero puede suponerse que sea similar al caso de una desmenuzadora de tres mazas y puede recomendarse 1,5 para el valor de K.

P – Fuerza hidráulica total en toneladas cortas [kN].

V - velocidad promedio de las mazas en pies/min [m/s].

Esta expresión ha sido de mucha utilidad a los moledores cubanos para calcular con una buena aproximación los consumos que deben esperarse en el equipo motriz a partir de tres

de las variables más importantes que intervienen en el proceso de molida como son la fuerza que actúa sobre las mazas, la velocidad tangencial de las mismas y el grado de preparación del colchón, posee además una gran ventaja ya que su aplicación es muy simple y solamente requiere el conocimiento sobre el valor de las dos variables más populares entre los moledores: la fuerza hidráulica total y la velocidad tangencial de las mazas.

2.4.3 Expresiones de Hugot para el cálculo de la potencia consumida en los molinos.

Hugot desarrolló un amplio estudio sobre el tema del consumo de potencia en los molinos.

En su edición de 1964, que se reimprimió en Cuba en 1980 y 1986 [16], consecuentemente con el planteamiento acerca de los seis términos que involucran el consumo de potencia en un molino planteó las siguientes expresiones:

1. **Potencia consumida en la compresión del bagazo**.

Para este término este autor dedujo, de las condiciones de alimentación a la entrada del molino y del proceso que sufre el colchón en la zona de contacto con las mazas, la siguiente expresión:

$$N_1 = 0{,}038 . P\, n . D \sqrt{\frac{\tau}{\rho . F}} \qquad \text{(II.3)}$$

N_1 – potencia consumida en la compresión del bagazo, en HP [kW].

P – fuerza hidráulica total sobre el cilindro superior, en toneladas [kN].

τ - carga fibrosa específica en kg/m^2/m (nótese que en este término se emplean unidades de metros cuadrados y de metros).

n – velocidad de rotación de los cilindros, en rev/min. Hugot define la carga fibrosa específica como la cantidad de fibra que es procesada por el molino en una unidad de tiempo, relacionada con el área desarrollada por la generatriz del cilindro superior en esa misma unidad de tiempo y este cociente se relaciona entonces con el diámetro de los cilindros, por eso es que prefiere dar la unidad de maza de fibra, la unidad de área, que representa la superficie desarrollada por la generatriz y la unidad de longitud que representa al diámetro de las mazas.

ρ - densidad del bagazo comprimido en el plano axial de los cilindros de salida en kg/m^3.

f – fibra del bagazo saliendo del molino, con relación a la unidad.

Para tener una idea más clara de lo que representa la carga fibrosa específica y del origen de la misma se dedujo por parte de Pérez [30] una expresión para determinar la misma.

Puede plantearse que la fibra procesada por minuto es:

$$F = \frac{1000.C.f}{24.60} \qquad \text{(II.4)}$$

F – kg de fibra procesada por minuto.

C – Capacidad de molida en Tm por día.

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

Si además se puede plantear la expresión para calcular el área desarrollada de los cilindros como:

$$S = \pi.D.n.L \qquad \text{(II.5)}$$

donde:

S – superficie desarrollada por la generatriz del cilindro superior en la unidad de tiempo, en m^2/min.

D – diámetro medio de la maza superior, en m.

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

L – longitud de las mazas, en m.

Al dividir la expresión (II.4) por la (II.5) se tendrá la carga fibrosa (q).

$$q = \frac{F}{S} = \frac{\frac{1000.C.f}{24.60}}{\pi.D.n.L} = 0{,}221\frac{C.f}{D.n.L} \qquad \text{(II.6)}$$

y al dividir esta expresión por el diámetro de la maza se tendrá:

$$\tau = 0{,}221\frac{C.f}{n.L.D^3} \qquad \text{(II.7)}$$

El diámetro se encuentra elevado al cubo en esta expresión pero es conveniente expresar sus resultados tal y como se explicó antes ya que esto hace más comprensible el término.

Hugot desarrolló una deducción distinta a la que se ha planteado en este trabajo pero arriba a valores similares. Dicho autor plantea que los valores de la carga fibrosa específica varían entre 10 y 15 kg/m^2/m, pero en realidad esto depende de la capacidad del tándem.

Debe señalarse que en la compresión del bagazo se consume la única energía útil en el molino. Todos los términos siguientes se refieren a pérdidas por diversas causas.

2. Potencia consumida por la fricción entre las chumaceras y los collarines.

En el caso de este término Hugot consideró las condiciones de trabajo en un cojinete de deslizamiento y obtuvo la expresión:

$N_2 = 0{,}0532.\ f_1.\ P.n.D$ (II.8)

donde:

N_2 – potencia consumida por la fricción entre las chumaceras y los collarines, en HP [kW].

f_1 – coeficiente de fricción entre la chumacera y el collarín.

Los demás términos ya se han identificado.

Hugot asignó a este coeficiente, después de analizar las propuestas de Tromp [42] y Varona [43] un valor de 0,06 y entonces.

$N_2 = 0{,}00304.P.n.D$ (II.9)

3. Potencia consumida por la fricción entre el bagazo y la cuchilla central.

En la deducción de la expresión para este término Hugot consideró la distancia entre la cuchilla y el eje del cilindro superior, el resbalamiento del bagazo sobre la maza superior, debido a la fricción del colchón en movimiento, en su parte inferior, contra una superficie en reposo como es la cuchilla central y obtuvo la siguiente ecuación:

$N_3 = 0{,}0578.f_2.P.n.D$ (II.10)

donde:

N_3 – potencia consumida por la fricción entre el bagazo y la cuchilla central.

f_2 – coeficiente de fricción entre la cuchilla y el bagazo.

Los demás términos ya se han definido. Hugot adoptó un valor de $f_2 = 0{,}4$ con lo que la expresión final será:

$N_3 = 0{,}00228.P.n.D$ (II.11)

4. Potencia consumida por la fricción de los raspadores y de la punta de la cuchilla con las mazas.

Para deducir la expresión correspondiente a este término Hugot supuso una presión lineal, por unidad de longitud de la fuerza necesaria para desprender el bagazo de la cuchilla y de los raspadores, y obtuvo la expresión:

$N_4 = 1{,}567\ L.n.D$ (II.12)

Nótese que, a diferencia de los otros términos, este no depende de la fuerza hidráulica total pero sí está influenciado por la longitud de las mazas.

5. Potencia consumida por el movimiento de los conductores intermedios.

Esta expresión depende de la masa que se transporta con el colchón por unidad de tiempo, de la longitud de la traza y de la inclinación de la misma así como del coeficiente de fricción entre el elemento portante y las correderas. Una simplificación en la deducción de este término condujo a Hugot a la siguiente expresión:

$N_5 = 1{,}418.L.n.D$ (II.13)

En la cual propuso que esta potencia sea una función de la velocidad tangencial del molino y de la longitud de las mazas.

Si se suman los cinco términos anteriores y la expresión resultante se divide por la eficiencia de la transmisión se obtiene la expresión:

$$N = \frac{n.D}{\eta}\left[0{,}102.P\left(0.373.\sqrt{\frac{r}{\rho.f}}+0{,}05\right)+3.L\right] \qquad \text{(II.14)}$$

Con la potencia expresada en HP [kW].

todos los términos de esta ecuación se han definido ya.

Debido a la gran cantidad de elementos o factores que Hugot tuvo en cuenta, se desarrollaron todas sus expresiones de cálculo ya que la expresión final que se obtenga será de utilidad a los fines posteriores de este trabajo.

En su edición de 1980 [15] Hugot introdujo dos términos importantísimos en el cálculo del consumo de potencia en un molino: **el factor de reabsorción (r)** y **la abertura dinámica de salida en el molino con relación al diámetro (ε_A)**, por lo que la expresión de la potencia consumida por la compresión del bagazo quedó de la siguiente forma:

$$N = 0{,}0304\frac{6r-5}{\sqrt{r}\left(r+\sqrt{r-1}\right)}.P.n.D.\sqrt{\varepsilon_A} \qquad \text{(II.15)}$$

Estos factores sustituyen a la densidad del bagazo, a la carga fibrosa específica y a la fibra de la caña con relación a la unidad, por tanto los demás términos debían aparecer con los mismos coeficientes pero este autor le asignó a la potencia consumida por la fricción entre el bagazo y la cuchilla central la expresión:

$N_3 = 0{,}00266.P.n.D$ (II.16)

En que varió ligeramente el coeficiente inicial.

En cuanto a la potencia absorbida por la fricción entre los raspadores y las mazas y para el movimiento del conductor intermedio, caracterizadas en las expresiones (II.12) y (II.13), les asignó en esta edición los coeficientes 2 [1,492] y 2 [1,492] respectivamente, en lugar

de 2,1 [1,567] y 1,9 [1,417] que aparecían en [16], pero esto no varía la expresión final. Con estos arreglos la expresión final para el consumo de potencia de un molino queda de la siguiente forma:

$$N = \frac{nD}{\eta}\left\{0{,}102.P\left[0{,}3\frac{6r-5}{\sqrt{r}\left(1+\sqrt{r-1}\right)}\sqrt{\varepsilon_A}+0{,}055\right]+3.L\right\} \qquad \text{(II.17)}$$

Donde la potencia se expresa en HP [kW].

Este autor define el factor de reabsorción como la relación entre el volumen de bagazo por unidad de tiempo por la abertura de salida del molino mientras este se encuentra operando y el volumen descrito por la generatriz de las mazas de salida en esas mismas condiciones, cuando dicha generatriz se multiplica por la velocidad tangencial de las mazas y por la abertura de salida. Puede ser calculado como:

$$r = k + 0{,}017\, v + 0{,}65\, \rho \qquad \text{(II.18)}$$

donde:

k – constante que depende del molino y que asume los siguientes valores:

k = 0,75 para un primer molino.

k = 0,65 para un segundo molino.

k = 0,60 para los siguientes molinos.

v – velocidad periférica de las mazas en m/min.

ρ - densidad de la fibra a la salida del molino (kg/dm^3).

La densidad de la fibra puede tomarse con los siguientes valores:

ρ = (0,38 a 0,55) para el primer molino.

ρ = (0,8 a 1,0) para el último molino.

Los valores intermedios se calculan por la media logarítmica.

Los valores que recomienda esta autor para el factor de reabsorción deben estar alrededor de 1,25.

Por su parte ε_A es la abertura específica de trabajo del molino, o sea, la relación entre el Setting dinámico de salida del molino y el diámetro medio de la maza superior.

$$\varepsilon_A = S_S / D \qquad \text{(II.19)}$$

En este caso S_S es la abertura de salida del molino en metros.

Para el caso de los primeros molinos Hugot recomienda que el primer coeficiente dentro del corchete en la expresión (II.17) sea de 0,5 [0,375] en lugar de 0,4 [0,3], debido al trabajo de preparación adicional que debe realizar este equipo. Esta recomendación es

para el caso en que el primer molino esté precedido por cuchillas, si además se instala una desmenuzadora después de las cuchillas, recomienda tomar 0,3-.

En 1986 Hugot [16] desarrolló un amplio estudio sobre el tema de la demanda de potencia en tándem de molinos y propuso una ecuación para calcularla, en la cual rectifica algunos términos empleados anteriormente:

$$N = \frac{nD}{\eta}\left\{P\left[0{,}4\frac{6r-5}{\sqrt{r}\left(1+\sqrt{r-1}\right)}\sqrt{\varepsilon_A}+0{,}075\right]+4L\right\} \qquad \text{(II.20)}$$

Donde:

P **:** Fuerza hidráulica total aplicada (t $_{cortas}$).

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

D: Diámetro medio de los cilindros (m).

η: Eficiencia de la transmisión

ε_A: Abertura específica de salida.

r: Factor de reabsorción.

L: Longitud de las mazas (m).

2.4.4 Ecuación empleada por el Dr. Eusebio Pérez para el cálculo de la demanda de potencia.

Pérez [30] desarrolló un método partiendo de la ecuación planteada por Hugot [16], en la cual tiene en cuenta la situación más generalizada actualmente en el funcionamiento de un molino para el caso específico de Cuba. En nuestro país se ha generalizado la utilización de motores independientes para el movimiento de los conductores intermedios, esta decisión se ha tomado con vistas a hacer más flexible la operación de este conductor [30]. Con esto se hace necesario restar el valor de la potencia demandada por el movimiento de los conductores intermedios de la total que demanda el equipo motriz que mueve el molino, pues aunque esta potencia se sigue demandando, ya no se puede tener en cuenta como carga del motor principal [30].

También se ha generalizado el empleo de la cuarta maza o alimentador forzado en el molino, la cual recibe el movimiento desde la maza superior a través de una corona habilitada al efecto. Pérez [30].

Eusebio agregó la ecuación de la demanda de potencia de la cuarta maza y eliminó la ecuación de la demanda de potencia por el movimiento de los conductores intermedios en

la ecuación general propuesta por Hugot [17] y obtuvo una ecuación adaptada específicamente a las condiciones de los centrales de Cuba.

$$N = \frac{n\,D}{1{,}34.\eta}\left\{P\left[0{,}4\,\frac{6r-5}{\sqrt{r}\left(1+\sqrt{r-1}\right)}.\sqrt{\varepsilon_A}+0{,}063\right]+1{,}5.L\right\} \qquad \text{(II.21)}$$

Donde:

P **:** Fuerza hidráulica total aplicada (t $_{cortas}$).

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

D: Diámetro medio de los cilindros (m).

η: Eficiencia de la transmisión

ε_A: Abertura específica de salida.

r: Factor de reabsorción.

L: Longitud de las mazas (m).

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

2.5 Eficiencia mecánica en la molida.

Un molino de caña de azúcar es un equipo de muy baja eficiencia mecánica ya que una gran parte de la potencia consumida por el motor se invierte en vencer las fuerzas de fricción que se producen en la transmisión desde el motor hasta el molino y dentro del propio equipo. Es importante conocer qué proporción de la potencia que se consume en el proceso de molida se invierte realmente en la compresión del colchón de caña para extraerle el jugo y preparar el bagazo para procesos posteriores.

El cálculo de la potencia que se consume en el equipo motriz de un molino depende de muchos factores, tal como se ha visto anteriormente, pero uno de los de mayor importancia es la eficiencia de la transmisión entre el equipo motriz y el molino. Debido a esto algunos investigadores como Jenkin [20] prefieren medir el torque en la barra de conexión y así conocer exactamente cuánto gasta el molino, junto con las coronas. Pero si lo que se desea conocer realmente es la potencia consumida por la unidad motriz, entonces deberá tenerse en cuenta esa eficiencia.

2.5.1 Eficiencia de la transmisión.

La eficiencia de la transmisión depende en primer lugar de la relación total de la transmisión, pero en segundo lugar es necesario tener en cuenta la calidad de los componentes de dicho sistema, o sea, cuán eficiente es cada una de los pasos a través de los cuales se transmite la potencia desde el equipo motriz hasta el molino.

La relación total de transmisión depende a su vez de la velocidad del molino y de la que posea el equipo motriz, La velocidad en la mayoría de los molinos puede tomarse entre 3 y 6 rev/min y entonces pueden establecerse las siguientes consideraciones:

- Las máquinas de vapor que se empleaban en muchos centrales azucareros trabajaban normalmente a algunas decenas de revoluciones y la relación de transmisión estaba en el orden de 10 a 20 como máximo. Este rango puede alcanzarse con dos pasos de engranajes. Por lo general en estas transmisiones antiguas se empleaban ruedas de dientes rectos en transmisión abierta, cuya eficiencia es relativamente baja.
- Para los motores eléctricos que mueven los molinos las velocidades angulares están en el orden de las 600 a las 900 rev/min y entonces la relación de transmisión debe ser de varios cientos. Para este caso se emplea al menos un reductor de dos pasos en la parte de alta y alguna transmisión abierta por lo que la eficiencia de la transmisión es menor que en el caso anterior si se empleara el mismo tipo de engranajes en los pasos de baja.
- Si el movimiento de los molinos se hace a través de una turbina entonces la velocidad angular del equipo motriz está en el orden de 3000 a 6000 rev/min y si se trata de mover el molino de que ya se habló se requerirá una relación de transmisión de alrededor de 1000. Esto requiere al menos dos reductores de dos pasos y la transmisión abierta en la parte de baja, con ruedas de grandes dimensiones. Cuando se emplean estas unidades motrices la eficiencia de la transmisión será menor que en los casos anteriores, aún cuando los reductores cerrados modernos poseen eficiencias muy elevadas.

Para que se tenga una idea de las pérdidas que se producen se tomó de Soderlund [39] el valor de la eficiencia en los distintos pasos que intervienen en la transmisión de un molino y, utilizando como equipo motriz una turbina de vapor se tienen las siguientes eficiencias:

- Primer reductor de alta ----------0,95 a 0,98
- Segundo reductor de alta ----------0,95 a 0,98

- Primer paso de engranajes de baja -------- 0,94 a 0,96
- Segundo paso de engranes de baja --------0,94 a 0,96
- Acoplamientos y barra de conexión ---------0,90 a 0,95
- Coronas ----------0,82 a 0,85

Sin tomar estos valores como absolutos puede notarse que en caso de utilizar una turbina como equipo motriz la eficiencia de la transmisión está en el orden de 0,53 a 0,71; esto sin tener en cuenta la eficiencia de la turbina.

Aquí debe destacarse una pérdida que no se tiene en cuenta por una parte algunos autores: la que se debe a las pérdidas friccionales entre los acoplamientos cuadrados y la barra de conexión entre la transmisión y la maza superior, que está en el orden de 0,90 a 0,95 y que depende sobre todo de la precisión en la fabricación de estos acoplamientos. En el caso de los tándems que emplean acoplamientos de cardán estas pérdidas son menores.

Con relación a la transmisión varios autores de textos de Diseño de Elementos Máquinas, tales como Reshetov [34] se inclinan por valores como:

- Engranajes cilíndricos cerrados ----------0,98
- Engranajes cilíndricos abiertos ----------0,95
- Cojinetes de rodamiento (cada par) ----------0,99
- Cojinetes deslizantes (capa límite) ----------0,98

Estos valores fueron considerados para buenas condiciones de lubricación y operación.

Estos valores, así como el de 0,75 para las coronas parecen los más lógicos en las condiciones de Cuba ya que las condiciones de fabricación de las coronas no garantizan la calidad requerida como para que sea más elevada la eficiencia.

En la actualidad se utilizan en la transmisión de algunos molinos los reductores planetarios que son elementos muy compactos y pueden alcanzar eficiencias del orden del 85 % o más de acuerdo con lo que se plantea en [34], pero este no es el caso de los molinos de Cuba.

Otra variante que se está empleando actualmente es la de colocar motores hidráulicos en el movimiento de las mazas. Uno de los esquemas ha sido propuesto por Soderlunds [39] a partir de la misma turbina y con la utilización de instalaciones hidráulicas se obtienen eficiencias en la transmisión entre un 67 y un 70 %, con la ventaja adicional de proporcionar movimiento independiente a cada maza, con lo cual se ha logrado incluso la investigación del consumo de potencia para el caso en que las tres mazas no giren a la

misma velocidad. En numerosas revistas del mundo entero se resaltan la eficiencia y versatilidad en el empleo de estas transmisiones. Esta no se emplea en nuestro país.

2.5.2 Otras pérdidas mecánicas.

Del análisis anterior puede deducirse que en la situación actual de Cuba las pérdidas mecánicas en el proceso de molida pueden llegar a ser mayores de un 50 % ya que a las que se producen en el proceso de transmisión habría que añadir las que se producen internamente en el molino y a las cuales ya se ha hecho alusión, Mayo [25] se refirió a un gasto de energía en la molida de un 36 % del total, lo cual implica pérdidas mecánicas totales de un 64 %; Varona [43] estimó la eficiencia mecánica del molino en un 35 %. Pudiera opinarse por algunos que estos valores son muy bajos pero las variantes de transmisión que se emplean actualmente en Cuba son casi las mismas que en aquellos momentos.

Los países que emplean la difusión refieren valores mucho más elevados de eficiencia, Walsh [44] opina que la eficiencia de los molinos no es mayor de un 25 a un 35 % y se plantea que el consumo de potencia y el costo de mantenimiento para una misma capacidad y una extracción similar es aproximadamente la mitad en un difusor que en un tándem de molinos

En cada uno de los procesos por los que atraviesa esta conversión energética es necesario que se gane conciencia de la necesidad de hacer más eficiente el mismo, de ahí la importancia de la capacitación del personal que opera los equipos.

Conclusiones parciales.

De los aspectos tratados en este capítulo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Son muchos los factores que influyen en el consumo de potencia en un molino, pero pueden ser divididos entre los inherentes a la operación del equipo y los externos al mismo.
- En los últimos tiempos se le ha prestado atención a un elemento operativo, al que se ha denominado “factor de reabsorción”, el cual juega un papel importante en la extracción del molino y también en el consumo de energía.
- De ninguna manera puede descartarse en la potencia que consume el equipo motriz la eficiencia de la transmisión.
- El camino que conduce a un menor consumo de potencia en Cuba pasa por la optimización de las variables operativas que influyen a la vez sobre la eficiencia energética y sobre la eficiencia tecnológica de la molida.
- Existen modificaciones que se han venido introduciendo en la molida en las últimas décadas como son el aumento en el diámetro de las mazas, en el paso del rayado de las mismas, las tolvas Donnelly y la cuarta maza alimentadora que han ejercido una notable influencia sobre la capacidad de molida, la extracción o ambas a la vez y no se ha cuantificado su influencia en el consumo de potencia.
- En este trabajo se emplea una expresión que tiene en cuenta la particularidad actual de que el equipo motriz principal ya no mueve el conductor intermedio pero tiene que darle movimiento a la cuarta maza. Se valora además con mayor precisión, la influencia que ejercen en la eficiencia general del equipo las coronas y los acoplamientos.

Capítulo 3: Cálculo del proceso y análisis de caso.

3.1 Método de cálculo empleado.

Para simular el proceso de molida en el tándem y establecer los parámetros de requerimiento de energía de una forma adecuada se empleó el método de montar en hojas de cálculo Excel todo el procedimiento.

La expresión de cálculo empleada fue la desarrollada por Pérez [30], que tomó como base la de Hugot 1986 [16] y la modificó para tener en cuenta la situación actual en que ya las unidades motrices de los molinos no mueven los conductores intermedios, sino que estos poseen motores independientes y en que se ha añadido al molino la cuarta maza alimentadora que sí recibe el movimiento desde las mazas convencionales que son alimentadas por la unidad motriz principal.

Esta expresión tiene en cuenta factores que no fueron considerados en otras similares. Por eso en hojas de Excel se lleva a cabo el procedimiento que sigue;

- Se llenan los datos constructivos y geométricos de las mazas de los cuales se obtiene la velocidad lineal de las mismas.
- Se toma la fibra en caña promedio que se espera para la zafra.
- Se aplica el método desarrollado por Hugot [16] para calcular la capacidad potencial de molida del tándem, teniendo en cuenta los equipos preparadores de caña.
- Se toma como dato la capacidad de molida real proyectada para la zafra. Aquí pueden compararse los valores reales tomados con los calculados para la molida potencial.
- Se aplica el método desarrollado en el manual de planta moledora para calcular las aberturas dinámicas y estáticas a montar en cada molino.
- Se calcula el factor de reabsorción en cada molino a partir de las consideraciones de Hugot.
- Se llenan los datos recomendados por la literatura para calcular las presiones a aplicar sobre el colchón de caña.
- Se toman a pie de obra los datos que permiten calcular los valores reales aplicados para estas presiones. Aquí se pueden de nuevo comparar valores.
- Con todos los datos anteriores se calcula la potencia demanda en cada molino.

Es ilógico pensar que un sistema de simulación basado en tantas expresiones, con muchas variables dentro de ellas y en que estas a su vez tienen en cuenta tantas

recomendaciones, pueda brindar datos de elevada precisión en una primera corrida. Un ejemplo de ello es el grado de preparación que se obtiene con los equipos encargados de esta tarea y para el cual se recomiendan valores dentro de un intervalo determinado pero los reales pueden ser diferentes por muy diversas causas.

Pero el propio método de cálculo en hojas Excel permite variar estos parámetros de acuerdo con las condiciones reales, que a su vez pueden variar dentro de una zafra, como ocurre con la fibra en caña, que a su vez tiene una marcada influencia en el Setting y en la capacidad de molida entre otros factores.

El otro aspecto importante es que se requiere montar para caso (tándem) las hojas de cálculo con las consideraciones que correspondan al sistema en particular.

3.2 Descripción del tándem objeto de estudio.

Para corroborar la exactitud del método empleado para la simulación del proceso se tomó como objeto de estudio el central Ifraín Alfonso, ubicado en el municipio de Ranchuelo.

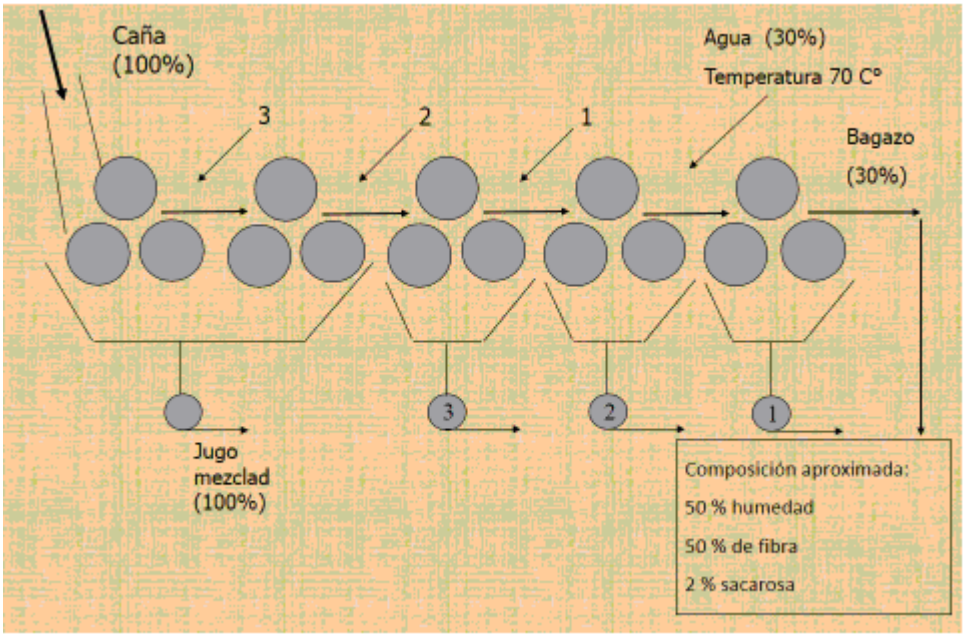


Figura 3.1 Esquema del tándem.

3.2.1 Descripción del central.

1. Datos de los sistemas de transportación y preparación de la UEB Ifraín Alfonso.

Transportador de caña # 1.

- Potencia del motor del transportador-37 kW (30 kW)

- Ancho entre Guarderas-84 cm
- Altura del Guarderas-de las tablillas a la parte superior es de 2.50 cm
- Velocidad angular del motor-887 rpm
- No posee variador de frecuencia
- Altura del colchón para moler la norma-de 1.80 a 2.00 m
- Corriente nominal del motor-60 A
- Corriente real del motor-55 A
- El ingenio cuenta con una desfibradora: la cual posee un motor con una potencia nominal de 400 kW y una potencia real de 300 kW, tiene una velocidad angular de 900 rpm, la corriente nominal es de 51 A y la real de 39 A
- Posee rompebultos: La potencia nominal del motor es de 25 kW y la potencia real es de 20 kW, su velocidad angular es de 1750 rpm, su corriente nominal es de 40 A y la real de 30 A.
- Posee niveladores con una potencia nominal de 11 kW y una potencia real de 8 kW.

Transportador de caña # 2.

- Potencia del motor del transportador-30 kW (25kW)
- Ancho entre Guarderas-84 cm
- Altura del Guarderas-de las tablillas a la parte superior es de 2.50 cm
- Velocidad angular del motor-1750 rpm
- Posee variador de frecuencia
- Altura del colchón para moler la norma-de 1.80 a 2.00 m
- Corriente nominal del motor-60 A
- Corriente real del motor-55 A
- En este transportador también se encuentra montada una desfibradora la cual posee un motor con una potencia nominal de 400 kW y una potencia real de 300 kW, tiene una velocidad angular de 900 rpm, la corriente nominal es de 51 A y la real de 39 A.

- Posee rompebultos: La potencia nominal del motor es de 25 kW y la potencia real es de 20kW, su velocidad angular es de 1750 rpm, su corriente nominal es de 40 A y la real de 30 A.
- Posee niveladores con una potencia nominal de 11 kW y una potencia real de 8 kW.

La potencia total consumida por los equipos de transportación, nivelación y preparación es de 711 kW.

2. Datos constructivos del tándem.

1. Posee 5 molinos
2. Sistema de alimentación-Todos tienen conductores intermedios que alimentan la caña por una tolva
3. Todos poseen 4ta masa
4. Menos el molino 1 todos los demás poseen Tolva Donnelly

Molino 1:

- Diámetro de las mazas-41 pulg (1041 mm)
- Longitud de las mazas-84 pulg (2134 mm)
- Tipos de rayado por maza: Paso-3 pulg (76,2 mm), angulo-50° de inclinación y 35° de inclinación para la masa cañera
- Potencia instalada en el motor del molino 1-400 kW
- Lecturas de la potencia real consumida-254 kW
- Velocidad angular del motor-600 rpm
- Corriente nominal-51 A
- Corriente real-39 A

Molino 2 y 3:

- Diámetro de las mazas-40 pulg (1016 mm)
- Longitud de las mazas-84 pulg (2134 mm)

- Tipos de rayado por maza: Paso-1.50 pulg (38,1 mm), angulo-50° de inclinación y 35° de inclinación para la masa cañera
- Potencia instalada en los motores de los molinos 2 y 3-630 kW
- Lecturas de la potencia real consumida-311 kW
- Velocidad angular del motor-600 rpm
- Corriente nominal-74 A
- Corriente real-53 A

Molino 4 y 5:

- Diámetro de las mazas-40 pulg (1016 mm)
- Longitud de las mazas-84 pulg (2134 mm)
- Tipos de rayado por maza: Paso-1.50 pulg (38.1 mm), angulo-50° de inclinación y 35° de inclinación para la masa cañera
- Potencia instalada en los motores de los molinos 4 y 5-800 kW
- Lecturas de la potencia real consumida-398 kW
- Velocidad angular del motor-900 rpm
- Corriente nominal-91 A
- Corriente real-53 A

3. Datos de los equipos auxiliares del tándem.

1. Conductores intermedios:

- Tipo de conductor-El molino 1 es de tablillas y los demás son de arrastre
- Potencia del motor-10 kW y 7.5 kW
- Velocidad angular-1160 rpm y 1750 rpm

2. Bombas de jugo:

- Potencia instalada-80 kW
- Velocidad angular-1785 rpm

- Poseen variadores de frecuencia.

3.2.2 Ejemplo de cálculo.

Datos reales del Ifraín Alfonso para esta zafra.						
Unidad de molida	1M	2M	3M	4M	5M	
Paso del rayado en la maza superior (mm)	76.2	38.1	38.1	38.1	38.1	
Angulo del rayado en la maza superior	50	50	50	50	50	
Paso del rayo en las mazas inferiores (mm)	76.2	38.1	38.1	38.1	38.1	
Angulo del rayado en las mazas inferiores.	35	35	35	35	35	
Fibra % caña =	0.15					
Vel. Ang. eq. Mot.(rev/min)	585	585	585	885	885	
Relación del reductor	30	33.77	33.77	33.77	33.77	
Número de dientes del piñón	26	26	26	26	26	
Número de dientes de la catalina	154	154	154	154	154	
Relac. total de transmisión	177.69	200.02	200.02	200.02	200.02	
Largo de las mazas (m)	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	
Veloc. Ang.mazas (rev/min)	3.29	2.92	2.92	4.42	4.42	
Diam. ext. maza mot. (m)	1.16	0.97	0.99	0.99	1.16	
Profundidad del rayadomaza mot. (m)	0.074	0.037	0.037	0.037	0.037	
Diam. med. maza mot. (m)	1.086	0.928	0.953	0.953	1.123	
Vel. Lin. maz.mot. (m/min)	11.24	8.53	8.76	13.25	15.61	
Capacidad Potencial de Molida en @s/día (calculada	357254					
Capacidad Potencial de Molida en t/día (calculada)	4060					
Capacidad de Molida en @s/día (real)	315157					
Capacidad de molida en t/h (real)	3581					
Tm de fibra/min.	0.36					
Entrada/Salida moliendo	1.50	1.66	1.84	2.04	2.50	
Punta de cuchilla /entrada moliendo	1.40	1.46	1.53	1.60	1.75	
Volumen unitario en la salida (m^3/Tm)	2	1.78	1.59	1.41	1.12	
Volumen unitario en la entrada	3.00	2.96	2.92	2.88	2.80	
Volumen unitario en la punta de la cuchilla	4.20	4.33	4.47	4.61	4.90	
Volumen req. en la entrada (m^3/min)	1.08	1.07	1.05	1.04	1.01	
Volumen requerido en la salida	0.72	0.64	0.57	0.51	0.40	
Volumen requerido en la punta cuchilla	1.51	1.56	1.61	1.66	1.77	
Superf de Maz. (m^2/min)	23.93	18.17	18.66	28.22	33.26	
Ajuste din. a la ent. (mm)	45.2	58.7	56.4	36.8	30.4	
Ajuste din. a la sal. (mm)	30.1	35.4	30.7	18.0	12.1	
Ajust. Din punt. Cuch. (mm)	63.3	86.0	86.4	58.9	53.1	
Flotac. maza superior (mm)	13	10	10	10	10	
Variaciónabertura/flotación (entrada)	0.78	0.78	0.6	0.6	0.78	
Variación abertura/flotación (salida)	0.78	0.78	0.93	0.93	0.78	
Variación de abertura (entrada, en mm)	10	8	6	6	8	
variación de abertura (salida, en mm)	10	8	9	9	8	
Punta de cuch. VS Flotac.	0.93	0.93	0.6	0.6	0.93	
Variación punta cuchilla (mm)	12.1	9.3	6.0	6.0	9.3	
Entrada en vacío (mm)	45.2	50.9	50.4	30.8	22.6	
Salida en vacío (mm).	20.0	27.6	21.4	8.7	4.3	
Punt de cuch. en vacío (mm)	51.2	76.7	80.4	52.9	43.8	
Factor de reabsorción.	1.26	1.16	1.16	1.29	1.45	
Fuerza Hidráulica total admisible™ (65*L)	454.12	454.12	454.12	454.12	558.91	
Potencia máxima para esta presión (kW)	334.41	254.84	251.25	366.55	500.64	
Cons. espec. Máximo (kW-h/Tm de caña)	2.24	1.71	1.68	2.46	3.36	
Pres. Hidr. Espec.Recomendadas (TM/dm2)	22.00	20.00	20.00	20.00	24.00	
Fuerza Hid. total recom. Tm(PHE*0.1*L*D)	509.12	395.43	406.08	406.08	574.20	
Pot. para esta presión (kW)	239.45	143.36	143.62	207.72	319.79	1053.95
Cons. espec. calculada (kW-h/Tm de caña)	1.60	0.96	0.96	1.39	2.14	7.06
Cons. espec.calculada (Kw-h/Tm de fibra)	11.07	6.63	6.64	9.60	14.78	48.71
Presión real aplicada en los pistones En lbs/pulg^2	3200.00	2800.00	2800.00	3400.00	3600.00	
Diámetro de los pistones en pulgadas	15.38	14.00	14.00	14.00	14.00	
Fuerza hidráulica total real en t.	540	392	392	476	504	
Potencia para esta presión	253.37	142.06	138.76	210.43	243.21	988
Cons. espec. calculada (kW-h/Tm de caña)	1.70	0.95	0.93	1.41	1.63	6.62
Valores calculados con las presiones reales	253.37	280.82		453.64		987.83
Valores reales de lectura.	254	311		398		963.00
Porciento de error	0.25	9.70		-13.98		-4.03

Capacidad calculada y real en @/día.

Consumo total esperado en kW y consumo específico en kWh/t de caña.

Consumo específico en kWh/t de fibra.

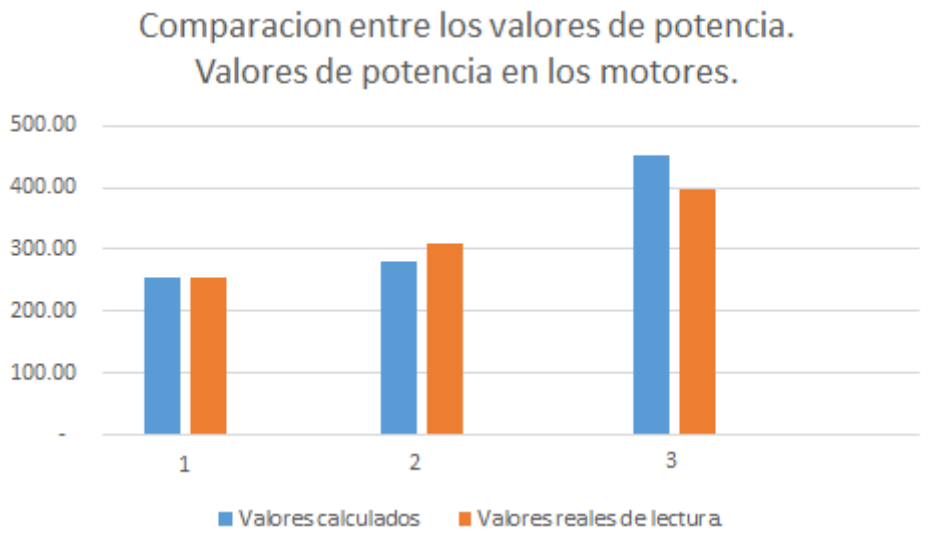
Metodo de la Farrell					
Calculo de los molinos	Ifrain Alfonso				
Unidad de molida	1M	2M	3M	4M	5M
Molida(@/dia)	315157.5				
Fraccion de fibra en caña	0.15				
Factor de seguridad	1.05				
Rayado de la superior (pasoxángulo)	3x50	11/2x50	11/2x50	11/2x50	11/2x50
Rayado de la cañera (pasoxángulo)	3x35	11/2x35	11/2x35	11/2x35	11/2x35
Rayado de la bagacera (pasoxángulo)	3x50	11/2x50	11/2x50	11/2x50	11/2x50
Bag-Imb		BAG-J3	J4	J5	AGUA
B E/S moliendo	1.4	2.3	2.4	2.5	2.7
Humedad del bagazo a la salida	67	58	53	52	48
Fibra del bagazo a la salida	33	42	47	48	52
RPM Motores	585	585	585	885	885
Relacion del reductor de alta	1	1	1	1	1
Relacion del reductor de baja	30	33.77	33.77	33.77	33.77
Piñon Z1	1	1	1	1	1
Catalina Z2	1	1	1	1	1
Piñon Z3	26	26	26	26	26
Catalina Z4	154	154	154	154	154
Reduccion	177.692	200.022	200.022	200.022	200.022
RPM Mazas	3.292	2.925	2.925	4.425	4.42
Diam Ext M.Super	40 1/2	38 1/8	39 1/8	39 1/4	40
Diam Ext M.Cañera	40 5/8	38 5/8	39	39 5/8	40
Diam Ext M.Bagacera	39 5/8	37 7/8	39 1/8	39 1/2	40
Prof.Ray.M.Sup	2 15/16	1 7/16	1 7/16	1 7/16	1 7/16
Prof.Ray.M.Cañera	4 5/16	2 1/8	2 1/8	2 1/8	2 1/8
Prof.Ray.M.Bagacera	2 15/16	1 7/16	1 7/16	1 7/16	1 7/16
Dmed M.Sup	37.5625	36.6875	37.6875	37.8125	38.5625
PPM	32.36	28.08	28.84	43.78	44.65
Factor 0	0.84	0.57	0.47	0.41	0.337
L.mazas (pulg)	84	84	84	84	84
Super de maza/min	226.51	196.54	201.89	306.44	312.52
Factor de calculo	2.174	2.506	2.439	1.607	1.576
Salida dinamica	1.826	1.428	1.146	0.659	0.531
Entrada dinamica	2.557	3.285	2.751	1.647	1.434
Flotacion	1/2	1/2	3/8	5/16	5/16
Variac.Abert./Flotac.Entrad	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Variac.Abert./Flotac.Salida	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
Variac.Abert.Entrada	0.3	0.3	0.225	0.1875	0.1875
Variac.Abert.Salida	0.465	0.465	0.3488	0.2906	0.2906
Entrada vacio	2 1/4	3	2 1/2	1 7/16	1 1/4
Entrada (PsFi Real)	2 15/16	3 5/16	2 7/8	1 13/16	1 9/16
(PsFi) Minimo entrada	0.4822	0.3653	0.3653	0.3653	0.3653
Comprob. Del Setting de entrada	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Salida	1 3/8	15/16	13/16	8-Mar	4-Jan
(PsFi) Minimo salida	0.4822	0.3653	0.3653	0.3653	0.3653
Comprob. Del Setting de salida	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Punta	2 2/3	3 1/4	3 1/8	2 1/16	1 3/4
Caida	1	1	1	1	1
Talon	3 11/16	4 1/4	4 1/8	3 1/16	2 3/4
Drenaje	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Boca min entre el bolillo y la m.sup	7 5/16	5 11/16	4 9/16	2 5/8	2 1/8
Boca max entre el bolillo y la m.sup	10 15/16	8 9/16	6 7/8	3 15/16	3 3/16
Distancia sup-cañera	39 3/16	39 9/16	39 13/16	39 1/8	39 7/16
Distancia sup-bagacera	38 1/2	37 1/2	38 1/2	38 5/16	38 13/16
Corona mas pequeña q se puede usar	C	C	B	C	C
Corona mas grande q se puede usar	A	A	A	A	A
Grueso colchon	6.08				
Consumo de la cuchilla(400 kW) y desfibradora	400		800		
kW/TCH en preparacion de caña	5.3				
Indice de preparacion (%)	89.15				
Factor de corteza (Fc)	1.16	1			
Diam de los pistones hidraulicos	15 3/8	14			
Presion hidraulica aplicada	3200	2800	2800	3400	3600
Carga hidraulica (t/cortas)	492	431	431	523	553.9
t/pie de maza	70.3	61.5	61.5	74.7	79.1
kW consumidos (Barreiros)	254	161	166	204	215
kW consumidos/motores (Barreiros)	254	311		398	
Consumo electrico total (Prep+Molinos)(kW)	1485				
kW/TCH de todo el tandem (Prep+Molinos)	10.33				

3.3 Comparación de ambos métodos.

De la comparación de ambos métodos se nota que en el primer motor el % de error es muy pequeño. En el segundo motor el valor real de lectura está por encima del calculado y en tercer motor este valor está por debajo del calculado. Estas diferencias pueden deberse a que sea necesario hacer ajustes en las constantes asumidas en el Excel para ajustarlas a las condiciones reales de la fábrica o a que los valores de preparación del colchón, altura el mismo y otros factores internos no hayan tenido suficiente estabilidad, lo cual no pudo corroborarse por las dificultades que se presentaron en el funcionamiento del tándem en la última parte de la zafra que fue cuando se hicieron las mediciones.

Los resultados del valor en que mayores son las diferencias coinciden con el motor en que las hojas de cálculo arrojan para los molinos valores de reabsorción están por encima del valor recomendado de 1,25, lo cual aconseja analizar los ajustes de los molinos.

3.4 Gráfico comparativo del consumo de potencia por cada método.



Cuando se suman los valores calculados por el Excel para el consumo de energía en los molinos y los correspondientes a los equipos preparadores el total es de 988 +711 = 1699 kW. Los valores de consumo correspondientes a los equipos de transportación y preparación representan un 42 % del total

Conclusiones parciales.

- El modelo representado en las hojas de cálculo Excel demuestra ser suficientemente representativo del proceso de molida, aunque requiere de ajustes para adaptar los cálculos a las condiciones reales del tándem.
- Al sumar el valor calculado en la tabla con los encontrados para los equipos de preparación y extracción se nota que el valor de estos últimos representa más de un 40 % del consumo total y no puede ser de ninguna manera despreciado ya que atenta contra la disponibilidad de entrega de energía al SEN, que ya es baja a partir de las posibilidades reales de generación que existen en Cuba y que no sobrepasan los 40 kWh/t de caña.

Conclusiones.

1. La búsqueda bibliográfica demostró que en Cuba y en el mundo han existido hombres que han dedicado su vida a desarrollar las investigaciones en torno a la producción de azúcar de caña. Pero en el aspecto del consumo de energía de los molinos aún queda un largo camino por recorrer.
2. De esta búsqueda se desprende que en el mundo se ha logrado aumentar la eficiencia mecánica de la extracción de jugo a través de la introducción de la difusión en dicho proceso, así como la utilización de motores hidráulicos y de reductores planetarios. Ninguna de estas soluciones es factible de introducir masivamente en Cuba en la actualidad por los costos que implica. El incremento de la eficiencia energética en los tándems cubanos en los próximos años podrá conseguirse sobre la base de optimizar la relación entre las variables operacionales de los molinos.
3. Se han determinado muchos de los factores que intervienen en el consumo de energía en la preparación de la caña para su molida y en la extracción del jugo. Estos pueden dividirse en internos y externos. Entre los internos son muy importantes la presión sobre el colchón y las características constructivas de las mazas, así como las cinemáticas del molino. Entre los externos de mayor importancia se encuentra la preparación del colchón.
4. Existen muchas expresiones para calcular el consumo de potencia de los molinos y todas tienen en cuenta algunos factores comunes pero los propios autores plantean que existen posibilidades de más de un 20 por ciento de diferencia en la precisión de los cálculos de acuerdo con las condiciones en que se aplique una expresión dada. Por tanto, es muy difícil hablar de una expresión de cálculo óptima.
5. En el trabajo se utilizó una metodología de cálculo en Excel, basada en el trabajo de doctorado de Eusebio Pérez, que permite relacionar de un modo sencillo y práctico el comportamiento de un tándem y la correlación entre las variables que intervienen en el proceso de molida.
6. De la correlación entre los factores que intervienen en la metodología se puede demostrar que las molidas altas y estables contribuyen a disminuir el costo por tonelada de azúcar producida ya que los incrementos en la cantidad de caña y de fibra son mayores que los crecimientos inherentes en el consumo de potencia, y de

esta forma se reduce el consumo específico por tonelada de caña molida y de fibra procesada.

7. En el estudio de caso se compararon los valores calculados en la simulación, los obtenidos por el método de la Farrell y el de Barreiro en el central y los valores reales de lectura siempre que esto fue posible.
8. Se añadieron en el consumo de energía factores no contemplados en otras investigaciones tales como el trabajo de las desfibradoras y los transportadores de caña entre otros y que inciden de manera negativa e importante en las posibilidades de entrega de energía al SEN.

Recomendaciones.

- En los casos en que el modelo representado en el Excel se vaya a aplicar en un caso concreto deben reflejarse en el modelo las particularidades de cada fábrica en particular y establecer las corridas en condiciones adecuadas de estabilidad de la molida.
- Continuar profundizando en los demás factores que no se tuvieron en cuenta en los trabajos anteriores.
- Si es posible a nivel de fábrica, pero si no, al menos a nivel de laboratorio, debe investigarse la correlación existente entre la eficiencia mecánica del tándem y la eficiencia tecnológica del mismo ya que estos dos elementos son básicos en la disminución del costo por tonelada de azúcar.

Bibliografía.

1. Argüelles P., J.; Domínguez G., M., “Ensayos de un Medidor de Torque en Ejes Rotatorios”, Revista Construcción de Maquinaria, UCLV, 27-33, Universidad Central de Las Villas, Cuba, 1986.
2. Barrios, J.A., “Cuatro siglos de la industria azucarera (II) ”, Revista Cañaveral, 5 (1), 52,53, La Habana, Cuba, 1999.
3. Barreiro, J. B. Manual de operaciones. Planta moledora. Dirección de maquinaria industrial. Minaz. La Habana. 2011.
4. Cabello, M. J., Cabello, J. J., Moya, J. *et al*. "Modelación matemática del funcionamiento de las coronas de molinos considerando la flotación de la maza superior". *Ingeniería Mecánica*. 2011, vol. 14, nº 3, p. 209-220. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/23/757. ISSN 1815-5944.
5. Campos P., Y.; “Perfeccionamiento del diseño de los acoplamientos cuadrados de molinos de caña”, Tesis doctoral, Universidad Central, Villa Clara, Cuba, 2002.
6. Castro Díaz-Balart, F., “Ciencia, Innovación y Futuro”, Ediciones Especiales, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 2000.
7. Chinchilla Varona, M., “Distribución de la potencia moliendo caña”, Memorias del congreso de La ATAC, La Habana, 1938.
8. Chinchilla Varona, M., “Importancia de la velocidad en la cantidad de agua manipulada y potencia consumida por un molino de caña”, Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1933.
9. Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en Cuba.Dr. Alfredo Curbelo Alonso, Dra. Bárbara Garea Moreda, División de Industria y Energía, Agencia de Ciencia y Tecnología, Cuba.
10. Díaz, A. e Iglesias, C. "Dinámica del proceso de extracción de jugo a compresión de la caña de azúcar para la producción de panela". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2012, vol. 21, nº 2, p. 81-85. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v21n2/rcta14212.pdf. ISSN 2071-0054.
11. Echarry, M, “Ingenios en la memoria”, Revista ATAC, 63 (2) 42-43, La Habana, Cuba, 2002.
12. Finalmente construyen planta de energía con biomasa, Reuters, abril 1, 2017

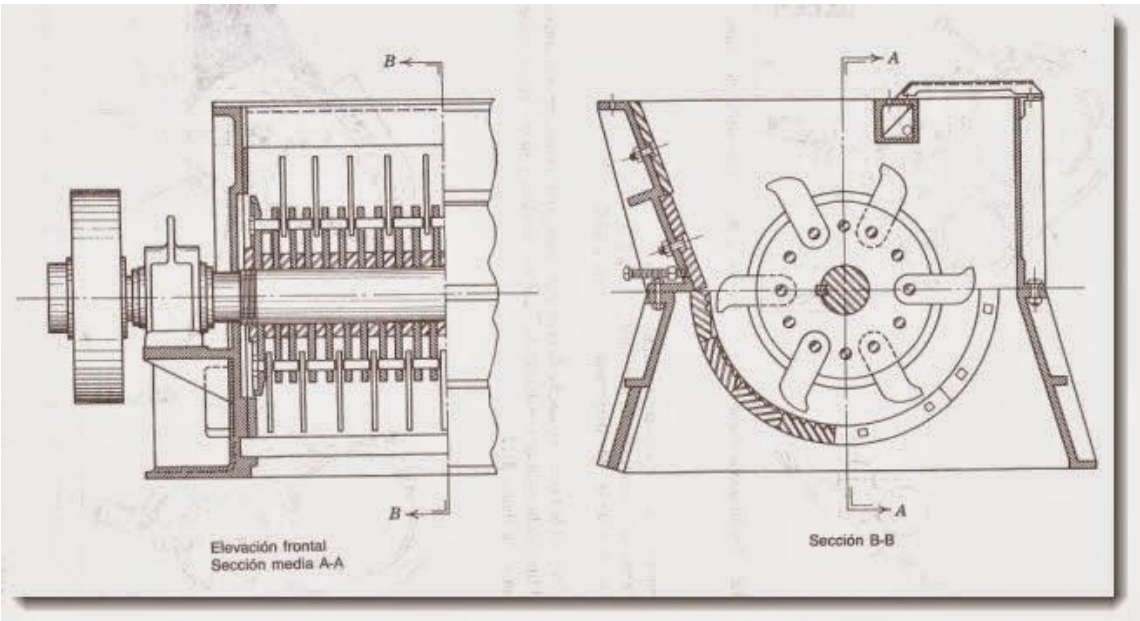
13. Gil, J. M., Nápoles, O. y Remedios, P. *et al*. "Evaluación del consumo de potencia del motor eléctrico del sexto molino de un tándem cañero". *Tlatemoani*. 2011, nº. 5, p. 1-5 [Consultado el: 2 de octubre de 2012]. Disponible en: http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/05/ogcsp.pdf. ISSN 1989-9300.
14. Goytisolo, R., Águila, N. y Arzola, J. "Elevación de la eficiencia de extracción de jugo de caña en los molinos de caña de azúcar". En: *7mo. Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos. Cuba. 2012. ISBN 978-959-257-323-9.
15. Hugot E. " Manual Para Ingenieros Azucareros". Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1980.
16. Hugot, E., "Manual para ingenieros azucareros", segunda reimpresión, Edición Revolucionaria, La Habana, 1986.
17. Hugot, E. y Jenkins, G. H. Handbook of cane sugar engineering. Amsterdam. ISBN: 9780444424389. Disponible en: http://books.google.es/books?id=hNdxQgAACAAJ. 1986.
18. IREDA, "Energy savings in Arunachalam sugars", tomado de Internet, La India, 2001
19. Jenkins, G. Introducción a la tecnología del azúcar de caña. La Habana. 23-24, 54-56, 77-79, 83-89, 127-141, 143-152, 156-157, 173-192, 195-202. 1971.
20. Y 17 Jenkin, D. M., "Medición del Torque en los Molinos", Memorias del XVIII Congreso de la ISSCT, Factory Comission, La Habana, 1983.
21. Lebron, J.L., "Procedure to fit a fourth roll to the conventional (3 roll) mill", Journal American Society of Sugar Cane Technologist, 12 115-116, USA, 1992 (79)
22. Lewinski,Juliusz;Grassmann Paulo;Kallin Tomas; Torque y consumo de potencia en molinos azucareros de cuatro mazas,2013
23. Lloyd, T., Eastment, S. y Mitchell, P. "Milling train maceration control utilising nir technology". *Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 2010, vol 32, p. 688-695. [Consultado el: 27 de Febrero de 2013]. Disponible en: http://www.assct.com.au/media/pdfs/M%2016%20Lloyd.pdf.
24. Mayo, J.R., "Discusión de la opinión del señor Tromp sobre la discusión del consumo de potencia en los molinos", Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1937.
25. Mayo, J.R., "Notas sobre molidas de caña a altas velocidades", Memorias del Congreso de la ATAC, La Habana, 1929.
26. MINAZ, "Criterios actuales de la industria azucarera cubana", Dirección de Maquinaria Industrial, La Habana, 1995.

27. MINAZ, “Indice de capacidades para ingenios de crudos de Cuba”, Editorial Ciencia y Técnica, Instituto Cubano del Libro, La Haban, 1971.
28. MINAZ, “Manual de operaciones de la planta moledora”, La Habana, 1996.
29. Pérez C., E .E.; “Estudio del consumo de potencia en los molinos de caña”, Tesis de Maestría, Universidad Central, Villaclara, Cuba, 1996.
30. Pérez, E. E.: Análisis de la correlación entre el consumo de potencia en un molino de caña de azúcar y las variables operativas del mismo. Dr. Jorge L Moya Rodríguez y Dr. Evelio Rodríguez González, Tutores. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Las Villas. 2003.
31. Ortiz, F., Tobón, L. G., Alvarado, A. M. *et al*. " Disminución de pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero". *Ingeniería Industrial*. 2008, vol. 2, nº 1, p. 1-23. [Consultado el: 27 de febrero de 2013]. Disponible en: http://academiajournals.com/downloads/OrtizTobon.pdf. ISSN 1940-2163.
32. Periódico Vanguardia, lunes-29-de-mayo-de-2017
33. Ramanriskina, J.; Satyanarayana, J; Rao, R.V., “Self setting mill and continuous pan for sugar factory”, in Modernization of Indian sugar industry, 135-138, New Delhi, India, 1990(114)
34. Reshetov, D., ¨Elementos de Máquinas¨, Editorial Vneshtorgizdat, Moscú, 1981.
35. Riera G., “Estudio del Consumo de Energía en el área de preparación y molienda de un ingenio azucarero”, Revista ATAC, La Habana, 1998 (122)
36. Rosales del Toro, U., Discurso Clausura del 48 Congreso de La ATAC, La Habana, 2002 (123)
37. Rosero, E. y Ramirez, J. "Modelado y control de molinos de caña de azúcar usando accionamientos eléctricos". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2009, vol. 6, nº. 3, p. 44-53. [Consultado el 2 de octubre de 2012]. Disponible en: http://zl.elsevier.es/es/revista/revista-iberoamericana-automatica-e-informatica-331/pdf/90083496 /S300/. ISSN 1697-7912.
38. Salomon,Roberto,Cuba potencia el empleo de biomasa para producir electricidad,27 junio, 2014 .
39. Soderlund, L.G., “Eficiency in sugar cane”, Suecia, 2002, (tomado de Internet)
40. Thaval, O. P. y Kent, G. "An enhanced mill extraction model". En: *34th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*. Australia. 2012. [Consultado el 2 de octubre de 2012]. Disponible en: http://eprints.qut.edu.au/50930/

41. Tromp, L.A., “El Cálculo de las aberturas en los trapiches”, Memorias del Congreso de La ATAC, La Habana, 1931.
42. Tromp L.A., “Machinery and equipment of the cane sugar extraction”, Editorial Idol Lane, Londres, 1956
43. Varona, M., “Importancia de la velocidad en la cantidad de agua manipulada y potencia consumida por un molino de caña”, Memorias del Congreso de la A.T.A.C. La Habana, 1950.
44. Walsh,G., “The Riviere extractor: A new approach to the extraction of juice from cane”, 103(1231)284,286,288-292,309, Techserve, Sudáfrica, 2002, (tomado de Internet).

Anexos.

Anexo 1: Desfibradora de caña.



Anexo 2: Nivelador montado en el árbol.

Anexo 3: Nivelador en funcionamiento.