



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica Industrial

**ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN
NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA**

Elmer Estuardo Salazar Ríos

Asesorado por el Ing. Edwin Manolo Tock Amézquita

Guatemala, enero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN
NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ELMER ESTUARDO SALAZAR RÍOS

ASESORADO POR EL ING. EDWIN MANOLO TOCK AMÉZQUITA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jorgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

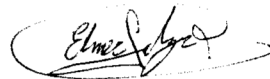
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADORA	Inga. Priscila Yohana Sandoval Barrios
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 2 de septiembre de 2015.



Elmer Estuardo Salazar Ríos

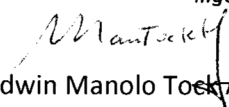
Guatemala, septiembre de 2016

Ingeniero
Juan José Peralta Dardón
Director
Escuela Ingeniería Mecánica Industrial

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he asesorado el trabajo de graduación **ANALISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICION Y MONTAJE DE UN NUEVO MOLINO EN EL TANDEM "A" DEL INGENIO SANTA ANA** realizado por el estudiante Elmer Estuardo Salazar Ríos quien se identifica con el carné No. 200818837, previo a optar al título de Ingeniero mecánico industrial.

Encuentro satisfactorio el trabajo, por lo que proceso a aprobarlo y remito a usted para el trámite correspondiente.

Edwin Manolo Tock Amézquita
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado No. 9742


Ing. Edwin Manolo Tock Amézquita
Asesor
Colegiado No. 9742



Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario **Elmer Estuardo Salazar Ríos**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Rocío Carolina Medina Galindo
Ingeniera Industrial
Col. 8957

Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, noviembre de 2016.

/mgp



FACULTAD DE INGENIERIA

REF.DIR.EMI.002.017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario **Elmer Estuardo Salazar Ríos**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DIRECTOR a.i.

Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, enero de 2017.

/mgp

De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.038.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO PARA LA ADQUISICIÓN Y MONTAJE DE UN NUEVO MOLINO EN EL TÁNDEM A DEL INGENIO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario: **Elmer Estuardo Salazar Ríos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO



Guatemala, enero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser fuente de vida y sabiduría.

Mis padres

Mi eterna gratitud a Elmer Vitelio Salazar Barrios y a Dora Maritza Ríos Villatoro, por regalarme la vida, por ser mi inspiración, motivación y respaldo en todo momento.

Mis hermanos

Claudia Carolina y Sergio Enrique Salazar Ríos, por el amor y comprensión que siempre me han regalado.

Mis amigos

Por brindarme su apoyo y amistad incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Pueblo de Guatemala	Por los recursos proporcionados a la Universidad a través de sus tributos.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme obtener una formación académica de vanguardia.
Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos adquiridos.
Ingenio Santa Ana	Por abrirme sus puertas para poder elaborar este trabajo.
Ingenieros	Manolo Tock y Gustavo de León, por apoyarme incondicionalmente durante esta etapa de formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ACTIVIDAD PRODUCTIVA DEL INGENIO SANTA ANA.....	I
1.1. El proceso de fabricación del azúcar	1
1.1.1. Recepción, descarga y alimentación	1
1.1.2. Extracción o molienda	2
1.1.3. Sulfitación	4
1.1.4. Alcalinización	5
1.1.5. Calentamiento y clarificación	5
1.1.6. Evaporación.....	6
1.1.7. Cristalización	7
1.1.8. Centrifugación.....	8
1.1.9. Refinación.....	8
1.1.10. Secado	8
1.1.11. Envasado.....	8
1.2. El proceso de cogeneración	9
2. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN TÁNDEM DE MOLINOS	11
2.1. Vírgenes	12
2.2. Mazas.....	13

2.3.	Maza Lotus.....	15
2.4.	Ranuras Messchaert	17
2.5.	Ejes de las mazas	18
2.6.	Cabezotes hidráulicos	19
2.7.	Acumulador hidráulico	21
2.8.	Peine o cuchilla central	22
2.9.	Peines o raspadores	23
2.10.	Cuchilla cuarta maza.....	24
2.11.	Bisagras laterales.....	25
2.12.	Coronas.....	25
2.13.	Chumaceras o cojinetes.....	26
2.14.	Equipos de lubricación	28
2.14.1.	Válvulas de lubricación.....	28
2.15.	Registros de enfriamiento	29
2.16.	Acoplamientos básicos para la transmisión de torque	30
2.16.1.	Acoples cuadrados.....	30
2.16.2.	Acoplamientos flexibles	32
2.17.	Equipos de accionamiento para molinos cañeros	34
2.17.1.	Turbinas de vapor	34
2.17.2.	Motores de corriente alterna (CA)	35
2.17.3.	Motores hidráulicos	37
2.18.	Transmisiones para molinos cañeros.....	38
2.18.1.	Reductores de velocidad.....	38
2.18.1.1.	Reductores de alta	39
2.18.1.2.	Reductores intermedios.....	40
2.18.1.3.	Reductores de baja	40
2.18.2.	Transmisiones planetarias.....	42

3.	PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL EN LA ACTIVIDAD DE MOLIENDA Y ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS.....	45
3.1.	Análisis de la operación y puntos críticos de control	45
3.1.1.	Tasa de producción	45
3.1.2.	Pol en bagazo.....	47
3.1.3.	Humedad en bagazo	49
3.1.4.	Indicadores clave de desempeño	49
3.1.4.1.	Presión en los molinos.....	50
3.1.4.2.	Disponibilidad en los molinos.....	51
3.1.4.3.	Velocidad de los molinos	52
3.1.5.	Ajustes del molino.....	53
3.1.5.1.	Ajustes en las mazas del molino.....	53
3.1.5.2.	Ajustes por la flotación de la maza superior.....	53
3.2.	Cuantificación de pérdidas	55
3.2.1.	Pérdidas de azúcar en el bagazo	55
3.2.2.	Pérdidas por puenteo de molinos	56
3.2.3.	Poder calorífico del bagazo	58
4.	FALLAS MÁS COMUNES EN LOS ELEMENTOS DE MOLINOS Y RUTINAS DE MANTENIMIENTO.....	61
4.1.	Fallas en las chumaceras	61
4.1.1.	Sobreflotación de la maza superior	61
4.1.2.	Altas cargas/bajas velocidades.....	62
4.1.3.	Contaminación del lubricante.....	62
4.1.4.	Lubricación inadecuada.....	62
4.1.5.	Obstrucción de conductos	63
4.1.6.	Constantes paradas y puestas en marcha de las mazas	63

4.2.	Desalineamientos.....	63
4.3.	Fallas en los rodamientos y cojinetes de los reductores de velocidad.....	65
4.4.	Fallas en las transmisiones	67
4.5.	Fallas en los reductores	69
4.6.	Fallas en los ejes de las mazas	69
4.6.1.	Torcedura de ejes	70
4.6.2.	Desbalanceo	71
4.6.3.	Grietas y fracturas	72
4.7.	Rutinas de mantenimiento predictivo	74
4.7.1.	Ensayo por partículas magnéticas	74
4.7.2.	Inspección por ultrasonido.....	75
4.7.2.1.	Preparación de los ejes para la inspección por ultrasonido.....	76
4.7.3.	Rutina de mantenimiento para las chumaceras de los molinos	78
4.7.4.	Rutinas de mantenimiento para los reductores de velocidad	79
5.	ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA ADQUISICIÓN DE UN NUEVO MOLINO	81
5.1.	Preinversión (estudio técnico)	81
5.1.1.	Disposición actual del molino 6 tándem A.....	81
5.1.2.	Análisis de potencia para molinos	83
5.1.3.	Acople flexible de eslingas para el nuevo molino	91
5.1.4.	Transmisiones planetarias para el nuevo molino	92
5.1.4.1.	Transmisión planetaria principal para el nuevo molino	93

5.1.4.2.	Transmisiones planetarias asistidas para el nuevo molino	95
5.2.	Factibilidad del proyecto	96
5.2.1.	Análisis de costos por operar con un molino menos.....	98
5.2.2.	Análisis de costos para mantener el molino actual de 40"x78"	99
5.2.3.	Cálculo económico del ahorro por sustitución del molino	102
5.2.3.1.	Ahorro por recuperación de azúcar ...	102
5.2.4.	Venta adicional de energía por disminución de la humedad en el bagazo	106
5.2.5.	Costos por consumo energético del nuevo molino 6	107
5.2.6.	Análisis FODA para la adquisición de otro molino	108
5.2.7.	Análisis financiero	110
5.2.7.1.	Análisis de opciones de inversión	113
5.2.7.2.	Cálculo del valor actual neto (VAN) ...	119
5.2.7.3.	Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR)	121
5.2.7.4.	Cálculo del retorno de la inversión.....	123
5.2.7.5.	Tiempo de retorno de la inversión	123
5.2.7.6.	Cálculo del beneficio-costos	124
5.3.	Infraestructura y montaje	125
5.3.1.	Guía para el montaje	126
CONCLUSIONES		137
RECOMENDACIONES		139

BIBLIOGRAFÍA.....141

ANEXOS.....145

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Disposición de un molino de caña de azúcar	11
2.	Vista lateral de una virgen de molinos.....	13
3.	Maza para caña de azúcar y sus partes básicas	15
4.	Maza Lotus.....	16
5.	Ranuras Messchaert	17
6.	Diseño del eje superior.....	19
7.	Diseño del eje inferior.....	19
8.	Vista en elevación de un cabezote hidráulico	20
9.	Detalle interior de un cabezote hidráulico	20
10.	Vista interna de un acumulador hidráulico	21
11.	Cuchilla central.....	22
12.	Posición de la cuchilla central en un molino.....	23
13.	Peine superior o bagacero	24
14.	Cuchilla cuarta maza.....	24
15.	Bisagras de un molino.....	25
16.	Coronas de un molino cañero	26
17.	Disposición de las chumaceras en una virgen	27
18.	Válvulas inyectoras de lubricación “DM” y “DD”	28
19.	Registro de enfriamiento de un molino.....	29
20.	Barra de acoplamiento y acoples cuadrados	31
21.	Acople flexible de eslingas	32
22.	Sistema molino-turbina de vapor.....	35
23.	Sistema molino-motor eléctrico	36

24.	Reductor de alta Lufkin	39
25.	Reductor intermedio.....	40
26.	Reductor de baja.....	42
27.	Vista interna de un sistema de engranajes planetarios.....	43
28.	Diagrama de flujo para la mejora continua en los ajustes de un molino durante la operación.....	54
29.	Diagrama causa-efecto de los problemas en los rodamientos	66
30.	Diagrama de esfuerzos para un eje de maza superior	71
31.	Superficie típica de falla por fatiga	73
32.	Porcentaje de incidencia de fallas en los ejes	73
33.	Ejemplo de estado de un eje para la inspección.....	77
34.	Diagrama de transmisión de potencia actual del molino 6.....	82
35.	Reductor planetario principal	94
36.	Transmisión planetaria asistida	96
37.	Diagrama de transmisión de potencia del nuevo molino 6.....	97
38.	Diagrama de flujo de efectivo, opción 1	122
39.	Colocación del gramil en las vírgenes del molino	129

TABLAS

I.	Cálculo de pérdidas de azúcar en bagazo, cinco zafras más recientes. Ingenio Santa Ana.....	56
II.	Cálculo de pérdidas por puenteo de molinos, cinco zafras más recientes. Ingenio Santa Ana.....	58
III.	Criterios para análisis de vibraciones	67
IV.	Disposición actual del tren de reducción del tándem A	81
V.	Tren de reducción actual del molino 6	83
VI.	Consumo (kW) de las transmisiones	84
VII.	Características de la transmisión actual del molino 6	85

VIII.	Características del motor eléctrico para la transmisión principal del nuevo molino 6	88
IX.	Características del motor eléctrico para las transmisiones asistidas del nuevo molino 6	89
X.	Características del variador de frecuencia para el motor principal del nuevo molino 6	90
XI.	Características del variador de frecuencia para los motores asistidos del nuevo molino 6	90
XII.	Características del acople flexible para el nuevo molino 6	91
XIII.	Factor de servicio para reductores planetarios en la industria	93
XIV.	Especificaciones para el reductor planetario principal del nuevo molino 6	94
XV.	Especificaciones para los reductores planetarios asistidos del nuevo molino 6	95
XVI.	Disposición modernizada del tren de reducción del tándem A	96
XVII.	Cálculo de la velocidad del tren de reducción del nuevo molino 6	98
XVIII.	Costos por mano de obra (US\$)	99
XIX.	Costos por reparación de las mazas (US\$)	100
XX.	Costos por reparación de las coronas (US\$)	100
XXI.	Costos por reparación de las chumaceras (US\$)	101
XXII.	Costos por reparación del guardajugos (US\$)	101
XXIII.	Costos de repuestos por seguridad (US\$)	101
XXIV.	Cálculo del poder calorífico del bagazo según su humedad	106
XXV.	Estimación de costos energéticos del nuevo molino 6	107
XXVI.	Análisis FODA para la adquisición de un nuevo molino	108
XXVII.	Detalle del presupuesto para el proyecto (US\$)	109
XXVIII.	Proyección de costos para mantenimiento del nuevo molino 6 (US\$) 110	
XXIX.	Flujo de ingresos del proyecto (US\$)	111

XXX.	Flujo de egresos del proyecto (US\$)	111
XXXI.	Estimación de la utilidad antes de impuestos (US\$)	112
XXXII.	Amortización anual a capital	114
XXXIII.	Cálculo de egresos del proyecto, escenario 1 (US\$)	115
XXXIV.	Cálculo de ingresos del proyecto, escenario 1(US\$)	116
XXXV.	Cálculo del flujo neto de efectivo del proyecto, escenario 1 (US\$) ...	117
XXXVI.	Cálculo de egresos del proyecto, escenario 2 (US\$)	118
XXXVII.	Cálculo de ingresos del proyecto, escenario 2 (US\$)	118
XXXVIII.	Cálculo del flujo neto de efectivo del proyecto, escenario 2 (US\$) ...	119
XXXIX.	Actividades de montaje y estimación de tiempos del proyecto	125

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
hp	Caballo de fuerza
cm	Centímetro
\$	Dólar estadounidense
°C	Grado Celsius
°F	Grado Fahrenheit
Hz	Hercio
Kg	Kilogramo
Kg/m ³	Kilogramo sobre centímetro cúbico
kNm	Kilo Newton metro
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio por hora
lb	Libra
psi	Libra por pulgada cuadrada
MHz	Megahercio
MPa	Megapascal
m	Metro
qq	Quintal
rpm	Revoluciones por minuto
Tc	Tonelada corta
TBH	Toneladas de bagazo por hora
TCM	Toneladas de caña molida
TCMD	Toneladas de caña molida por día
TCMH	Toneladas de caña molida por hora

TCH	Tonelada de caña por hora
TF	Toneladas de fibra
TFH	Toneladas de fibra por hora

GLOSARIO

Acople	Elemento mecánico que sirve para conectar tramos de diferentes ejes y de esta manera transmitir energía.
AGMA	Siglas en inglés de la Asociación de Fabricantes de Engranés de los Estados Unidos, (American Gear Manufacturers Associations).
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero, (American Iron and Steel Institute).
ASTM	Sociedad Americana de ensayos de materiales (<i>American Society for Testing of Materials</i>).
Bagazo	Residuo leñoso de la caña de azúcar resultante luego del proceso de extracción de jugo en un molino.
Brix	Porcentaje en peso de los sólidos en una solución pura de sacarosa.

BTU	Unidad térmica británica; es la cantidad de energía necesaria para elevar a una libra de agua de una temperatura de 63 °F a 64 °F.
Calor latente	Energía necesaria para cambiar de fase una sustancia.
Calzo	Son láminas o platinas que se colocan entre dos cuerpos para nivelarlos.
Chute	Tolva rectangular que alimenta los molinos de caña.
DIN	Instituto Alemán de Normalización (Deutsches Institut für Normung).
<i>Donelly</i>	Conductor inclinado que eleva el bagazo molido para la alimentación del siguiente molino.
Eficiencia	Es el rendimiento obtenido de un proceso o de una máquina en relación con los recursos invertidos.
Entredós	Unión o acoplamiento intermedio para unir los ejes de las mazas con los de los reductores, formado por una barra cuadrada a la que se conectan dos acoples.

Eslingas	Son cinchos fabricados generalmente de poliéster que sirven como elementos intermedios en los acoples flexibles para la transmisión de las fuerzas de tracción; son dispositivos de seguridad que, en caso de existir sobre torques, se rompen para evitar daños al reductor y al acoplamiento.
Fibra	Materia seca insoluble en agua contenida en la caña o en el bagazo.
Guarapo	Es el jugo extraído durante el proceso de molienda de la caña.
Humedad en el bagazo	Es la cantidad de agua remanente en el bagazo luego de ser comprimido por los molinos.
Imbibición	Es el proceso en el cual se aplica agua o jugo a un bagazo para mejorar la extracción de jugo en el molino siguiente.
Maceración	Proceso en el cual se aplica guarapo procedente del último molino al bagazo, con el objetivo de mejorar la extracción.
Muñón	Es la parte externa de un eje, la cual es pulida de tal forma, que pueda girar en la chumacera.

Pol en bagazo	Es la sacarosa remanente en el bagazo, luego de ser comprimido por los molinos.
Puente grúa	Grúa fija que se desliza sobre rieles ubicados en alto, que se utiliza para mover los componentes del tándem de molinos.
Ratio	Es la razón entre dos magnitudes que refleja su proporción.
Reductor	Mecanismo de engranes acoplados para aumentar la potencia de transmisión, reduciendo la velocidad de rotación.
Sacarosa	Disacárido natural formado por el enlace bioquímico de los monosacáridos y la fructuosa.
Setting	Proceso de ajuste que consiste en determinar una diferencia de medidas entre las mazas cañera, bagacera y la cuchilla central, tomando como referencia el punto de presión máximo de la caña en el molino, según la posición relativa de la maza superior en estado de trabajo.
Tándem	Es el conjunto de molinos y conductores intermedios (Donelly), dispuestos en serie en el área de molienda del ingenio.

Torque	Magnitud física, también conocida como par; es el momento de fuerza que se ejerce sobre un eje para provocar movimiento de rotación.
Ultrasonido	Es un tipo de vibración mecánica que se da en un rango mayor al audible por el oído humano.
Vibración	Se da cuando un objeto oscila alrededor de una posición de equilibrio.
Virador	Equipo mecánico que se utiliza para voltear los carretes que transportan la caña, y depositarla en las mesas de recepción de caña.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en un análisis técnico-económico que fundamenta la adquisición y sustitución de un nuevo molino en el tándem A del ingenio Santa Ana, a partir de la necesidad de mejorar la eficiencia de extracción del jugo de caña, la disminución del pol en el bagazo y de los costos de mantenimiento y operación del molino, con lo que se espera alcanzar un incremento sustancial en la productividad general del tándem A.

Inicialmente se introduce al lector en el conocimiento de los procesos productivos que tienen lugar en el área industrial de un ingenio azucarero. Luego, mediante la conceptualización de la terminología básica de los componentes que conforman un tándem de molinos de caña, se espera facilitar la comprensión sobre el equipo y las tecnologías que se utilizan en el proceso de extracción de jugo de caña, lo que servirá de base para el desarrollo de los análisis que sustentan la adquisición del nuevo equipo.

Adicionalmente, se da a conocer la temática del mantenimiento de los equipos que conforman la unidad de molienda del ingenio. Dependiendo del equipo y tecnología con que se cuenta, se establecen las rutinas de mantenimiento necesarias para mantener el equipo con la mayor disponibilidad de tiempo de trabajo, a través de la reducción de tiempos de parada o sin operación por mantenimientos correctivos.

Para la elaboración del presente proyecto se eligió como equipo crítico que debe ser sustituido el molino No. 6 del tándem A, considerando la antigüedad y limitada capacidad del equipo actual, así como la posición estratégica dentro del

tándem, ya que al ser el último molino tiene a su cargo la fase final de la compresión de la caña, y es donde se logra exprimir finalmente todo el jugo, luego de ser aplicada la imbibición y agua de maceración, además de que su funcionamiento determina el nivel de humedad presente en el bagazo que sale hacia las calderas.

Para justificar la importancia en el aumento de la productividad del ingenio, al efectuar el cambio del equipo de molienda, se establecen los parámetros que se mejoran en el proceso de extracción del azúcar, tales como la velocidad del flujo y tasa de compresión del bagazo que pasa por el molino, logrando una mejor extracción de azúcar y la venta adicional de energía eléctrica como resultado de la mejor eficiencia calórica del bagazo.

La conveniencia de realizar la inversión consistente en la opción de compra de un molino de 45"x90" se sustenta a través de criterios técnicos y económicos, y finalmente se desarrolla un análisis financiero para determinar si es mejor utilizar únicamente capital propio o una combinación entre capital propio y financiamiento bancario para la adquisición. El análisis determina que la mejor opción es una combinación de capital propio y financiamiento bancario.

OBJETIVOS

General

Determinar la relación beneficio/costo de la adquisición de un nuevo molino en el tándem A del Ingenio Santa Ana.

Específicos

1. Determinar la conveniencia de cambiar el actual molino No. 6 del tándem A por uno de mayor capacidad, por medio de un análisis FODA.
2. Evaluar dos escenarios para un proyecto de inversión y así considerar el más favorable.
3. Determinar los índices financieros relevantes y el escenario óptimo para realizar el proceso de sustitución del molino No 6 del tándem A del Ingenio Santa Ana.
4. Cuantificar las pérdidas promedio que se tuvieron en las últimas cinco zafas en los puntos críticos de control de la operación de molienda.
5. Determinar las ventas adicionales de azúcar que se podrían alcanzar al mejorar la eficiencia del proceso de molienda en el molino No. 6 del tándem A.

6. Estimar las ventas adicionales de energía eléctrica que se podrían obtener con el cambio del molino No. 6 del tándem A.
7. Elaborar una guía para la determinación de las actividades a desarrollar en el montaje del nuevo molino No. 6 del tándem A.

INTRODUCCIÓN

En el ingenio Santa Ana, ubicado en Escuintla, Guatemala, el departamento de Mantenimiento Mecánico Industrial es el encargado de mantener en operación óptima todos los equipos que conforman el tándem de molinos, así como de la supervisión de la fabricación y maquinado de las piezas de repuesto para los equipos de la fábrica. Además, tiene las atribuciones de planeación y ejecución de proyectos de inversión, entre los que se incluyen proyectos de mejora estructural y de gestión para la adquisición de nuevos activos.

El rol que juega dicho departamento es de vital importancia, puesto que depende del mismo que la molienda durante la época de zafra sea consistente; mientras que durante el período de reparación este departamento se encarga del desmontaje de los equipos para realizar los trabajos de maquinado necesarios para reajustarlos a un nivel deseado de servicio. Es importante tener en cuenta que debido al desgaste estos ajustes varían zafra con zafra.

Dada la naturaleza de producción del ingenio, es preciso considerar la exigencia en las acciones requeridas para mantener en operación los equipos de grandes dimensiones en un marco de mejora continua. Aunado a ello, es importante considerar que un paro de la maquinaria representa grandes pérdidas en la operación, por lo que disminuir la cantidad de mantenimientos correctivos y realizar únicamente los mantenimientos preventivos programados son factores clave para el éxito en la productividad.

Con base en los aspectos anteriores nace la intención de llevar a cabo un estudio para determinar, con el respaldo de la teoría respectiva, la influencia que

tendrá en la productividad el cambio del último molino del tándem A del Ingenio Santa Ana dentro de un contexto propiamente estratégico, que con el paso del tiempo pueda ser considerado dentro de los planes operativos de la organización, como la base que sustente la ejecución de inversiones similares.

1. ACTIVIDAD PRODUCTIVA DEL INGENIO SANTA ANA

1.1. El proceso de fabricación del azúcar

La fabricación industrial de azúcar conlleva la aplicación de varios procesos para convertir el jugo de caña en cristales, eliminando impurezas que pudieran contaminarla, afectando la inocuidad en su consumo y reducir la calidad del producto final.

El proceso de fabricación del azúcar se describe a continuación.

1.1.1. Recepción, descarga y alimentación

El proceso inicia con el pesado de los camiones que transportan la caña cosechada de los campos a la entrada del área industrial, donde también se determina la calidad de la materia prima a partir de muestras que se analizan continuamente en el laboratorio de control de calidad. En esta etapa es importante diferenciar las condiciones del corte de la caña que se recibe, ya que dependiendo de si es caña larga o en trozos, serán los procedimientos en la operación de las mesas de alimentación de caña y en los molinos.

La caña que llega a la fábrica se descarga sobre las mesas de alimentación por medio de viradores con capacidad de 50 toneladas cortas (Tc). En las mesas de caña se aplica un lavado con agua tratada y con una temperatura de entre 110 y 120 °F, eliminando los sólidos o materia extraña que contenga, como tierra, piedras o residuos vegetales que se adhieren a la caña en el campo durante el alce para cargar los contenedores (jaulas) que la transportan a la fábrica.

Luego la caña se somete a un proceso de preparación que consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de troceadoras, picadoras oscilantes y desfibradoras, para poder pasar a la extracción del jugo.

1.1.2. Extracción o molienda

El objetivo de la molienda de caña es separar el jugo que contiene sacarosa del resto de la caña, constituido principalmente por fibra. El término extracción se emplea para expresar el porcentaje de sacarosa que ha sido extraído de la caña en los molinos y es igual a la sacarosa en el jugo crudo y diluido, expresada como porcentaje de la sacarosa en caña. Se puede asumir que la caña está conformada por tres componentes, cada uno con dos subcomponentes: fibra vegetal (materia insoluble) y sólidos disueltos (también conocidos como brix).

Los sólidos disueltos consisten en materia de caña soluble en agua tales como: sacarosa (usualmente se mide en forma aproximada como polarización o pol), otros materiales denominados genéricamente no sacarosa (otro material soluble que se halla en solución) y agua.

Al molino entra la caña preparada por la desfibradora, donde se reduce al tamaño del tallo y por la picadora donde se desmenuza convirtiéndolo en astillas, dándole un tamaño uniforme para facilitar la extracción de jugo en los molinos. La caña preparada es llevada a la tolva que alimenta los molinos (chute) por medio de una banda transportadora; esta banda agrega un retardo al flujo de caña antes de llegar al chute.

El flujo de caña es alojado en el chute, que tiene como propósito homogeneizar la entrada del bagazo a las mazas. En el modelo del chute se relaciona el flujo de salida respecto del flujo de entrada. Por último, el bagazo llega a las mazas, donde por compresión mecánica realizan la separación del

jugo del material fibroso de la caña de azúcar. Se considera que el flujo de bagazo que sale del chute y entra a las mazas se encuentra compuesto por fibra, agua y brix.

En la separación, un porcentaje determinado de agua queda en el bagazo, y el resto sale con el jugo exprimido. De igual forma ocurre con el brix, un porcentaje queda en el bagazo y el resto sale en jugo diluido. El material que sale como bagazo de las mazas es fibra. El bagazo que sale del molino está constituido por el agua, brix y fibra que queda después de la separación, y el jugo primario en el primer molino está constituido por el agua y el brix liberados en la separación.

La extracción se lleva a cabo en los molinos que son alimentados con caña preparada y consiste en exprimir la fibra de caña a presiones elevadas, utilizando cilindros de gran tamaño, llamados mazas. Los molinos están diseñados para extraer tanto jugo como sea posible. En el ingenio Santa Ana este es un proceso continuo que actualmente se realiza en dos tandems (grupos) de molinos con capacidad de molienda diaria total en día regular de 19,200 Tc. distribuidas en: tandem A 10,500 Tc y tandem B 8,700 Tc. Cada 16 días se programa un mantenimiento general por tandem, intercalando durante una semana el tandem A, y la siguiente el tandem B. Durante el día de mantenimiento programado la molienda promedio se reduce a 16,200 Tc.

Para hacer más eficiente el proceso de molienda se aplica la maceración, que consiste en remojar el bagazo con los jugos que se obtienen después de la primera etapa de molienda. El jugo extraído por un molino se aplica al molino anterior. En el último molino se aplica agua de imbibición al bagazo antes de su paso por este. El rango de temperatura de aplicación varía entre 145-160 °F. La imbibición aumenta la extracción de sacarosa aproximadamente en un 15 %.

Las medidas de desempeño críticas en el proceso de extracción son: porcentaje de sacarosa o pol en bagazo (cantidad de sacarosa que no es posible extraer y se pierde en el bagazo que es conducido hacia las calderas para ser quemado) y porcentaje de humedad en bagazo (cantidad de agua que no es exprimida del bagazo en el proceso de molienda, por lo tanto, hace menos eficiente el proceso de quema de bagazo en las calderas puesto que pierde poder calorífico).

El jugo extraído en la molienda contiene mucho bagazo en suspensión, conocido generalmente como bagacillo o *cush-cush*. Para eliminar este bagacillo en los jugos se pasan primero por filtros perforados con agujeros de 1 mm de diámetro. Para el ingenio Santa Ana, en el tándem A están dispuestos filtros horizontales fijos. Al pasar por el filtro el jugo se deposita en un tanque, en tanto que el bagacillo que ha sido separado se recoge por medio de un conductor de raspador que lleva el bagacillo de nuevo a los molinos.

En el tándem B el jugo extraído del primer molino es bombeado y dirigido a la parte interna de un tamiz rotativo con forma cilíndrica de 2,500 mm de ancho por 5,000 mm de largo, que gira en un rango de velocidad de 6 a 8 revoluciones por minuto, donde es filtrado por gravedad en secciones de rejillas en acero inoxidable AISI 304L (4 secciones radiales y 3 axiales) con apertura de 0,5 mm.

1.1.3. Sulfitación

El jugo proveniente de los molinos pasa por calentadores que llegan a temperaturas entre 140 y 155 °F. Luego pasa por la torre de sulfitación, bajando el pH para producir azúcar blanco.

La presencia de sustancias colorantes en el azúcar es indeseable por lo que la producción de azúcar con coloraciones fuera de los límites establecidos puede ocasionar grandes pérdidas económicas para la empresa.

La función de la torre de sulfitación es mezclar el jugo mixto proveniente de los molinos con el bióxido de azufre (S_2O). En la torre el jugo cae por gravedad, en tanto que vapores de azufre recorren la torre en sentido inverso. El flujo de azufre se controla por medio de la medición de la acidez (pH) de la mezcla resultante.

1.1.4. Alcalinización

Después del proceso de sulfitación se agrega lechada de cal al jugo. Este proceso recibe el nombre de alcalinización. Se realiza para que el calcio reaccione con los fosfatos libres y forme fosfatos tricálcicos. Estos contribuyen en la reacción de la acril-amida con la materia orgánica en el proceso de clarificado, evitando la inversión de la sacarosa. El calentamiento se realiza en intercambiadores de calor horizontales, que se da a partir de vapor proveniente de las turbinas de escape, con una presión aproximada de 20 psi.

En el tanque *flash*, el jugo, al ser liberado a presión atmosférica sufre una pequeña evaporación; con esto se evita que los flóculos floten o decanten con lentitud por la presencia de burbujas en el interior.

1.1.5. Calentamiento y clarificación

El jugo alcalizado pasa a la siguiente etapa de calentamiento para activar las reacciones entre la cal y los óxidos de fósforo presentes en el jugo, y precipitar las impurezas orgánicas e inorgánicas en la clarificación posterior.

Luego el jugo es alimentado a un clarificador rápido de bajo tiempo de retención en el que las impurezas se precipitan por gravedad. El proceso de clarificación se refuerza con la adición de floculante, que al entrar en contacto con el jugo retiene las impurezas y las precipita.

Los lodos sedimentados en el clarificador se conducen a la estación de filtros donde se les aplica agua caliente para extraerles el jugo azucarado que contienen.

La filtración consiste en tomar los lodos y adicionarle bagacillo para darle mayor consistencia y mejor filtrabilidad para procesarlos en los filtros que retiran la parte líquida (jugo filtrado), quedando una torta seca llamada cachaza, que es enviada al proceso de compostaje para la producción de abonos orgánicos. El jugo filtrado es retornado al proceso de calentamiento de jugo para ser reprocesado en los clarificadores.

1.1.6. Evaporación

Esta operación incrementa la concentración del jugo clarificado hasta un contenido de sólidos disueltos alrededor de 65 a 68 %, lo que la convierte en el principal consumidor de vapor. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que la fábrica requiere, y por lo tanto el arreglo de los evaporadores es de gran importancia.

El uso de múltiples efectos de evaporación en serie hace posible reducir la demanda de vapor, por lo que la mayor parte del agua es evaporada mediante este proceso.

La operación del sistema de evaporación en la planta es de quintuple efecto, tanto para la línea de azúcar blanco como para la línea de crudo. En ella

se fijan las condiciones de entrada, salida, nivel de cada evaporador y extracción de vapores vegetales hacia el exterior.

La evaporación se realiza en evaporadores tipo Roberts en los que el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas que confluyen en el mismo sentido. El jugo pasa de un evaporador a otro con bombas denominadas “de transferencia”. El control global de un evaporador se hace a través de la estabilización de cinco factores muy importantes:

- La concentración del producto final,
- La presión absoluta en el último cuerpo,
- La alimentación de vapor y jugo al primer evaporador,
- Remoción de condensados y gases incondensables,
- El control de incrustación en cada evaporador.

1.1.7. Cristalización

Este proceso es llevado a cabo por la concentración de la meladura y mieles intermedias en tres etapas llamadas cocimientos. Para la cristalización de la sacarosa se utiliza un sistema de dos plantas. Las diferentes plantas se elaboran en tachos *batch* y uno continuo.

Este es un proceso demorado que industrialmente se acelera introduciendo al tacho unos granos microscópicos de azúcar denominados semillas. La experiencia del operador debe juzgar el punto exacto del cocimiento, para la obtención de un buen producto.

1.1.8. Centrifugación

Los cristales de azúcar se separan de la miel restante en las centrifugas, que son equipos cilíndricos que giran a gran velocidad. La miel pasa a través de las telas, mientras los cristales quedan atrapados dentro de las centrifugas y luego se lavan con agua. Las mieles pueden volver a los tachos o bien se procesan por terceros en destilerías para la producción de alcohol. El azúcar pasa entonces al proceso de secado y enfriado.

1.1.9. Refinación

Para la producción de azúcar blanca refinada existe un proceso adicional que utiliza como materia prima azúcar blanco estándar.

En este proceso se disuelve el azúcar a 60 grados brix; luego se le adiciona carbón activado y tierra diatomácea. Esta solución se hace pasar por primera y segunda filtración en filtros verticales, hasta obtener un licor claro. El licor es evaporado y empieza la cristalización de los granos.

1.1.10. Secado

En el proceso de centrifugado se utiliza agua de condensado para lavar el azúcar, lo que da como resultado humedades entre 0,3 % y 0,6. Es necesario entonces pasarla por un proceso de secado para alcanzar niveles entre 0,2 % para azúcar crudo y 0,03 % para azúcares blancos.

1.1.11. Envasado

En el ingenio se producen las siguientes presentaciones:

- Azúcar crudo. De estas se derivan:
 - Azúcar cruda a granel, que se almacena en una bodega denominada 1A en forma de volcán, a piso. El azúcar crudo de exportación se carga en góndolas a granel que la transportan al punto de embarque.
 - Azúcar cruda VHP (*very high polarization*). Esta se almacena en estibas de no más de 60 sacos de alto (aproximadamente unos 15 metros de altura). El empaque de esta presentación es de 50 kg.
- Azúcar estándar: se empaca en sacos jumbos de 1 335,4 kg y es comercializada en el mercado local.
- Azúcar refinada: la cual es empacada en presentaciones de 1,000 kg y 50 kg. La mayor parte de esta azúcar es para la exportación, muy poca se queda para consumo local.

1.2. El proceso de cogeneración

El bagazo sale de los molinos a través de conductores que lo dirigen hacia las calderas con condiciones específicas de operación y humedad. Cuando existe remanente es almacenado al aire libre.

El proceso de cogeneración en el ingenio Santa Ana se divide en dos bloques, conocidos como bloque 1 y bloque 2. El bloque 1 cuenta con 4 calderas que trabajan únicamente con bagazo; la caldera 1 produce vapor con una presión de 200 psi; las calderas 4 y 7 con una presión de 600 psi y la caldera 6 con 850 psi. También cuenta con una caldera que puede trabajar con una mezcla de

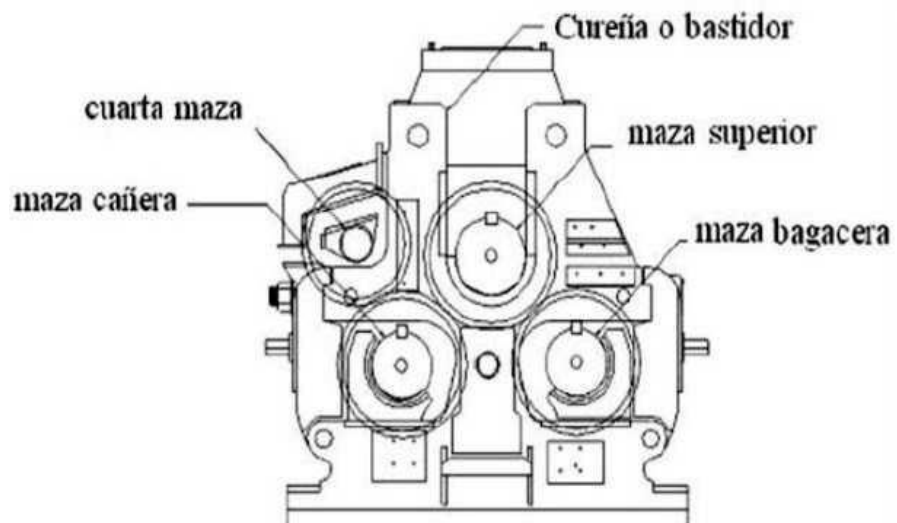
bagazo y bunker C a una presión de 850 psi. El bloque 2 tiene una caldera que puede trabajar con una mezcla de bagazo y carbón con una presión de 1,200 psi.

El bloque 1 tiene la capacidad de producir 60 MW de energía eléctrica; cuenta con los turbogeneradores Topping (5 MW), Trona (15 MW), TGM (15 MW) y Condensing (25 MW). El bloque 2 tiene una capacidad instalada de 62,4 MW. Esta energía producida sirve para suplir las necesidades energéticas del ingenio, el excedente de energía eléctrica es vendido a la red eléctrica nacional.

2. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN TÁNDEM DE MOLINOS

El molino de caña constituye la unidad más importante en los equipos de extracción de jugo en la industria azucarera. En un principio los molinos estaban constituidos de tres cilindros o rodillos horizontales cuyos centros se ubicaban en los vértices de un triángulo isósceles; estos rodillos eran conocidos como: maza superior, maza cañera y maza bagacera. En la actualidad es común ver molinos de 4 mazas, a los que se les ha añadido una maza adicional llamada cuarta maza, aunque también existen molinos de 5 y 6 mazas. El propósito es mejorar la extracción a través de lograr que el colchón de bagazo pase por más fases de compresión.

Figura 1. Disposición de un molino de caña de azúcar



Fuente: MEJÍA CORREA, Felipe. *Elaboración de un manual técnico ilustrado para el cambio de un molino Fletcher de 28" x 48" en el Ingenio San Carlos S. A.* p 30.

El Ingenio Santa Ana cuenta con dos tandems de molinos, conocidos como tandem A y tandem B. El tandem A está compuesto por seis molinos de cuatro mazas cada uno, con tres transmisiones de velocidad por cada uno, siendo estas las transmisiones de alta, media y baja velocidad. El tandem B consiste en una serie de cinco molinos; los molinos dos al cinco son de cuatro mazas cada uno; el primer molino es del tipo Walker de seis mazas con igual número de transmisiones para cada molino.

2.1. Vírgenes

Un molino está compuesto por dos vírgenes (también conocidas como cureñas o bastidores), armaduras laterales (entre 8 y 12 toneladas) que soportan todos los accesorios del molino. Construidas de acero al carbono fundido, y colocadas de forma paralela entre sí a una distancia determinada; se montan sobre bancazos de hierro a los que se fijan por medio de pernos de anclaje. Los bancazos se sujetan a los cimientos de concreto por medio de pernos de diámetro y largo calculados de acuerdo con el tamaño del molino. Consta de tres bisagras por molino, dos que soportan y dan ajustes a las mazas inferiores por medio de pernos de empuje y una a la cuarta maza.

Las principales fuerzas que deben ser soportadas por las vírgenes son:

- Internamente: tensión entre las fuerzas de separación entre las mazas del molino; las mayores son las fuerzas verticales impuestas por los cabezotes hidráulicos sobre las chumaceras de la maza superior y las reacciones en la maza bagacera, la cañera y la cuchilla central. Estas fuerzas son mucho mayores que el peso del molino y sus mazas.
- Externamente: los cimientos deben soportar el peso del molino y la reacción al torque de accionamiento del molino.

Por lo anterior, los nuevos diseños de molinos favorecen usualmente la construcción con acero maquinado o fundido en lugar de hierro fundido como en los viejos diseños.

Figura 2. **Vista lateral de una virgen de molinos**



Fuente: *Productos para la industria panelera*. www.talleresolaya.com/industria-panelera.

Consulta: marzo de 2015.

2.2. Mazas

Son cilindros de pared gruesa de acero o de fundición gris encamisados en ejes de acero (usualmente AISI-SAE 1045 o 4140) sobre el que se ajusta por contracción térmica. Son apoyados en chumaceras de bronce ubicadas en las vírgenes. Las medidas de las mazas son determinadas por el diámetro de la camisa (medida de diente a diente) por el largo de la misma; son expresadas generalmente en pulgadas.

Las mazas superior, cañera y bagacera están dispuestas en los vértices de un triángulo imaginario con la maza cañera del lado de la entrada de caña; la

maza bagacera del lado de la salida de la caña y la maza superior arriba de las otras. La extracción de jugo se realiza durante el tránsito de la caña entre las parejas formadas por: maza superior-cañera y maza superior-bagacera.

El paso de la caña por la abertura entre las parejas de maza superior-cañera y maza superior-bagacera hace que estas tiendan a separarse. Los ejes de las maza cañera y bagacera están apoyados de modo que no puedan desplazarse, pero al eje de la maza superior le es permitido desplazarse verticalmente (flotación del molino) por medio de un diseño especial de chumacera.

La cuarta maza se utiliza para ayudar en la alimentación de la caña a la pareja de maza superior-cañera (por esto se le conoce también como maza alimentadora).

La cuarta maza es adicionada frecuentemente al molino básico de tres mazas. Esta puede ser:

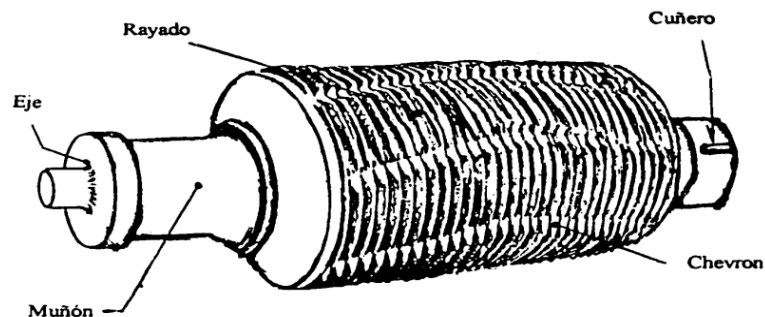
- Una maza alimentadora ligera, frecuentemente adicionada a molinos existentes de tres mazas para redirigir la caña y asistir la alimentación cuando se instala una tolva o *donelly*.
- Una cuarta maza adicional de igual tamaño que las otras mazas, integral al molino original, diseñado para efectuar extracción y también alimentación.

En los casos donde se incorpora una cuarta maza de igual tamaño que las otras, es casi siempre accionada con piñones a partir de la maza superior, usualmente en el lado libre de accionamiento del molino. Algunos pocos molinos han sido producidos con accionamientos independientes para la cuarta maza.

En las camisas de hierro fundido o hierro gris se tornean ranuras a lo largo de la misma, cada ranura tiene forma de triángulo con ángulos entre 35 y 55 grados con la punta y el fondo planos, semejante a la rosca de un tornillo tipo nacional americano; la profundidad del diente del rayado puede variar según se requiera en el diseño. El rayado de los dientes en los molinos ayuda a:

- Romper la caña
- Mejorar la tracción al presentar las mazas mayor área superficial de contacto con la caña.
- Proveer una fuerza adicional de extracción debido a las caras inclinadas de los dientes del rayado.

Figura 3. **Maza para caña de azúcar y sus partes básicas**



Fuente: HUGOT, Emile. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 110.

2.3. Maza Lotus

Existe un tipo especial de maza creado para permitir la salida más fácil del jugo generado en las zonas de más alta presión entre las mazas del molino y que además permite moler más caña con el mismo tamaño de maza. Esa maza, que normalmente es la superior, tiene la camisa construida en acero en vez de hierro fundido.

Existen dos diseños en su construcción, en uno se le hacen canales longitudinales al eje, repartidos en su circunferencia exterior donde va montada la camisa. A la camisa se le perforan agujeros distribuidos circularmente en los fondos de los dientes de manera que coincidan con la distribución de los canales y que el jugo pase por ellos hasta los canales y salga por los extremos de la camisa. En el otro diseño los canales se hacen en la camisa, en la periferia del diámetro interior, donde se ajusta con el eje.

Con el uso de mazas Lotus la humedad en el bagazo puede ser reducida de 2 a 2.5 % en condiciones de operación adecuadas. Un problema común en las mazas Lotus es mantener libres las vías axiales y radiales de partículas de bagazo, puesto que, si estas se encuentran bloqueadas, se generan problemas de embagazamiento en el molino.

Figura 4. **Maza Lotus**

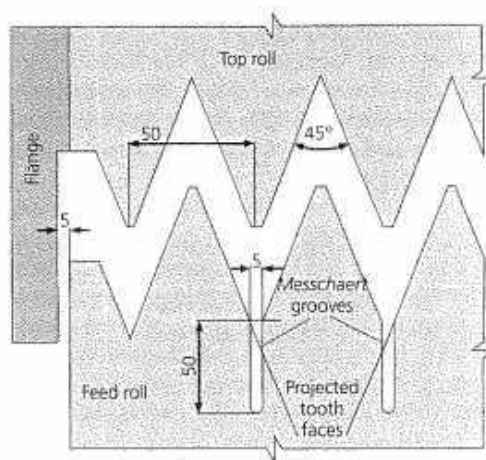


Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.4. Ranuras Messchaert

Las ranuras Messchaert son canales circulares que se colocan en el ranurado normal de las mazas; están diseñados para permitir el drenado del jugo en las zonas donde se producen altas presiones, brindándole una salida inmediata para escurrir sin obstáculo, a través del cilindro. Estas ranuras pueden ir alternadas o en todos los dientes.

Figura 5. **Ranuras Messchaert**



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 146.

Las ranuras Messchaert no son recomendables para mazas superiores debido a que de esta manera no habría una salida fácil para el jugo, a excepción del que sale en el bagazo, y debilitarían seriamente la maza que se encuentra con el mayor esfuerzo de molienda y por lo tanto tiene más riesgo de romperse. El drenado desde la superficie superior del bagazo que pasa a través del molino es un problema considerable, ya que el jugo debe fluir en las raíces de las ranuras Messchaert todo el trayecto de rotación hasta la primera compresión de la maza; este problema dio lugar al concepto de maza Lotus para mejorar el drenaje de la maza superior.

Para evitar que los Messchaert se llenen de bagazo y dejen de ser útiles, se instalan peines detrás de las mazas, consistentes en barras de acero que llevan una punta de frente y se prolongan hasta el fondo del Messchaert.

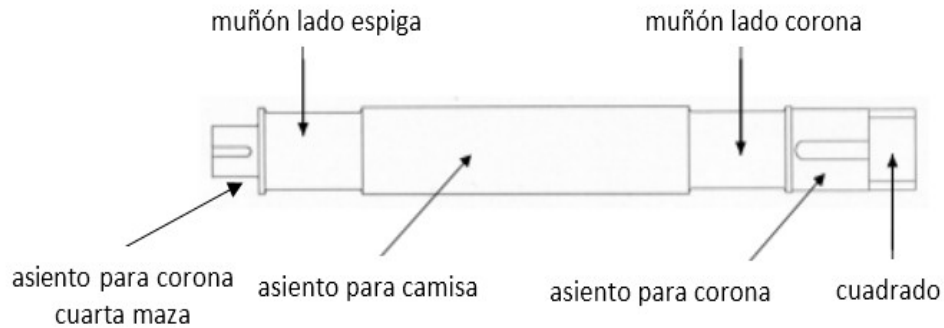
2.5. Ejes de las mazas

Son especificados en la norma ASTM 1045 o 1042, forjados, normalizados, alineados, homogeneizados, de grano fino y con certificados de prueba no destructiva de ultrasonido. Normalmente se compran las barras cilíndricas y en el taller del ingenio se les dan las dimensiones mediante los tornos para mazas a las diferentes secciones, de acuerdo con su posición en el molino.

Si el eje se prepara para una maza superior, las secciones de que consta son las siguientes: partiendo del extremo donde recibe el movimiento de la transmisión, el eje tiene una sección cuadrada que es la que se acopla a la transmisión; luego una sección cilíndrica con uno o dos cuñeros, donde va la corona o engrane que transmite el movimiento a las mazas cañera-bagacera. Continúa la sección que sirve de muñón, que asienta sobre la chumacera o cojinete. Luego, la parte donde va montada la camisa de hierro fundido y finalmente el otro muñón y una sección de menor diámetro para la corona que va a mover la cuarta maza.

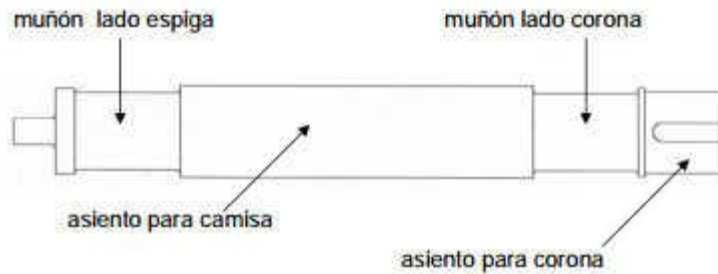
Para las mazas inferiores la diferencia es que el eje no lleva la parte cuadrada y para la corona de cuarta maza.

Figura 6. **Diseño del eje superior**



Fuente: CANO MARROQUÍN, Cesar Augusto. *Aplicación de transmisiones hidrostáticas en molinos cañeros*. p. 36.

Figura 7. **Diseño del eje inferior**

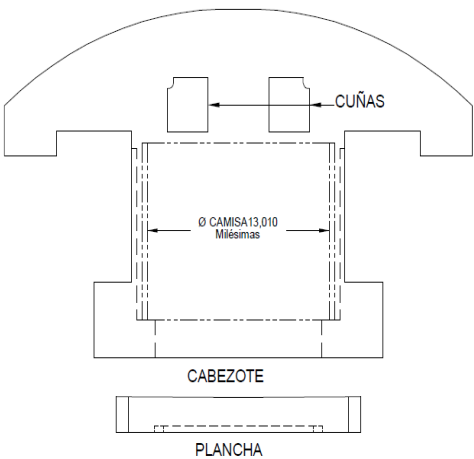


Fuente: CANO MARROQUÍN, Cesar Augusto. *Aplicación de transmisiones hidrostáticas en molinos cañeros*. p. 36.

2.6. Cabezotes hidráulicos

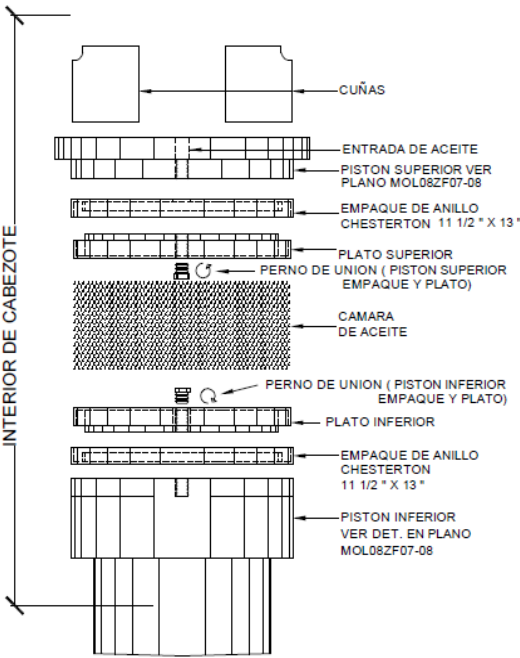
Para garantizar la extracción del jugo se aplica fuerza al eje de la maza superior a través de dos cilindros hidráulicos dispuestos sobre las dos chumaceras del eje. Se contrarresta el empuje realizado por el colchón de caña que pasa por el molino, permitiendo cierta flotación de la maza superior y asegurando una presión constante sobre la misma.

Figura 8. **Vista en elevación de un cabezote hidráulico**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 9. **Detalle interior de un cabezote hidráulico**



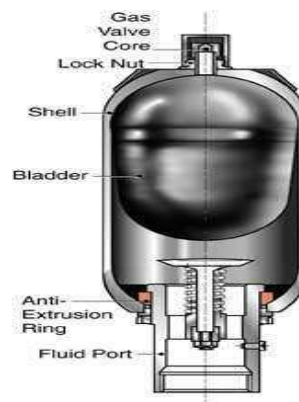
Fuente: Ingenio Santa Ana

2.7. Acumulador hidráulico

El más común es el acumulador de gas-aceite construido para soportar altas presiones internas, compuesto por una botella de acero dentro de la cual está un diafragma (vejiga especial de hule) que se precarga con nitrógeno seco a una presión de 2,000 psi, que con la presión hidráulica va aumentando hasta una presión de 2,500 psi. Básicamente es un cilindro metálico, similar a uno de oxígeno conectado a un circuito de aceite, que llena los espacios vacíos por fuera de la vejiga, y se expande o contrae para ajustar los cambios de volumen.

El acumulador debe colocarse tan cerca de los molinos como sea posible para minimizar el amortiguamiento por la fricción del flujo; este dispositivo opera a la misma presión aplicada sobre los pistones del cabezote hidráulico. El circuito está conectado al cabezote hidráulico (por medio de una manguera de 1 pulgada de diámetro con conectores Aeroquip en sus extremos, con capacidad para 6,500 psi), al bajar o subir el pistón dentro del cabezote, por la flotación de la maza superior, la vejiga se expande o contrae manteniendo una presión constante sobre la maza.

Figura 10. **Vista interna de un acumulador hidráulico**

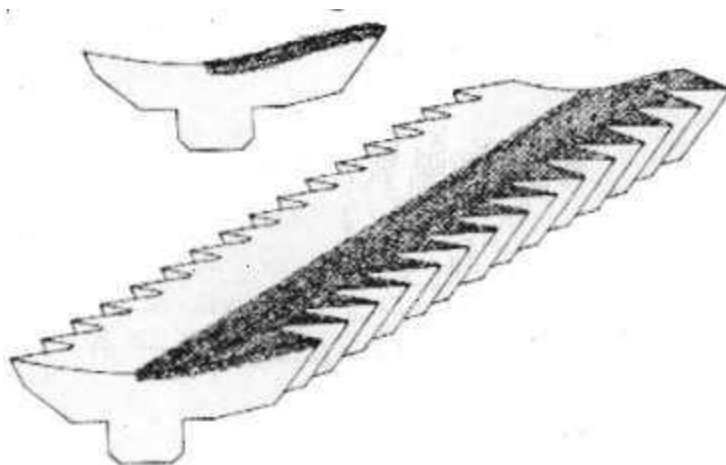


Fuente: Productos del Aire, S. A.

2.8. Peine o cuchilla central

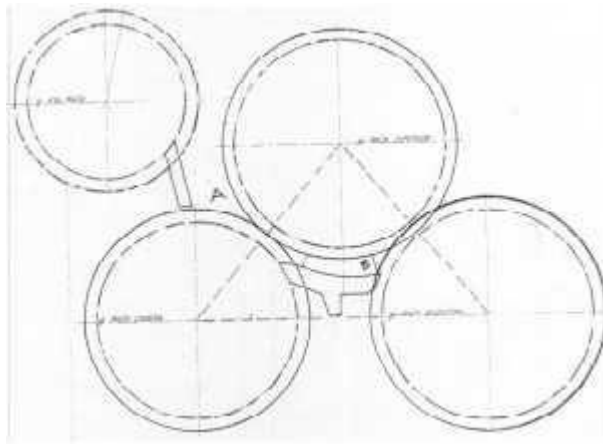
Es el raspador encargado de limpiar el ranurado de la maza cañera. Generalmente son construidas en hierro fundido o en acero SAE 1040, y también tiene la función de servir como puente, permitiendo el paso del bagazo desde la entrada hasta la salida del molino. Las cuchillas centrales, a diferencia de los otros raspadores, pasan por un proceso de metalizado durante su fabricación, debido que por su localización dentro del molino es complicada su sustitución en caso sea requerida.

Figura 11. **Cuchilla central**



Fuente: RIVERA, Carlos Humberto. *Diseño de la cuarta maza para molinos en el proceso de fabricación de azúcar del Ingenio El Baúl*. p.10.

Figura 12. **Posición de la cuchilla central en un molino**



Fuente: CANO MARROQUÍN, Cesar Augusto. *Aplicación de transmisiones hidrostáticas en molinos cañeros*. p. 38.

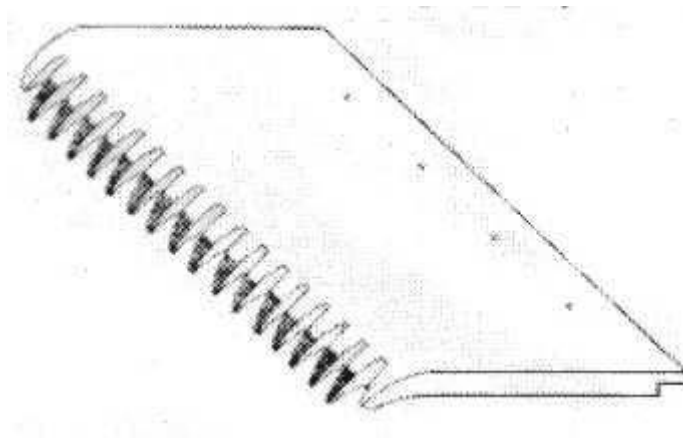
2.9. Peines o raspadores

Son barras de acero que llevan de frente cierto número de dientes que encajan perfectamente entre el ranurado de las mazas. Son esenciales puesto que, al formarse zonas de alta presión, la fibra de la caña se mete entre los dientes y si no se quita, llenaría el rayado, quedando las mazas como cilindros lisos. El objetivo de los raspadores es desprender la fibra que pudiese quedar pegada debido a la alta compresión. Si el peine trabaja en la maza superior se le conoce como peine superior y en la maza bagacera como peine bagacero.

El peine va atornillado a una lámina que a su vez se atornilla a un eje cuadrado que lo soporta; este eje tiene sus extremos cilíndricos que entran en chumaceras sujetadas a las vírgenes, tienen unos brazos que funcionan como palancas tensionadas por resortes, lo que permite que el peine “siga” a la maza superior cuando esta flota.

La diferencia entre el peine superior y el bagacero este es macho y va al centro (posee un diente en el centro del peine) y el peine superior es hembra al centro (en el centro del peine no tiene dientes).

Figura 13. **Peine superior o bagacero**



Fuente: RIVERA, Carlos Humberto. *Diseño de la cuarta maza para molinos en el proceso de fabricación de azúcar del Ingenio El Baúl*. p.10.

2.10. Cuchilla cuarta maza

Se utiliza para limpiar los fondos de los dientes de la cuarta maza, es similar en su función a la de los peines. No permite que el bagazo se salga entre la cuarta maza y la maza cañera. Generalmente se construye de lámina de hierro negro.

Figura 14. **Cuchilla cuarta maza**



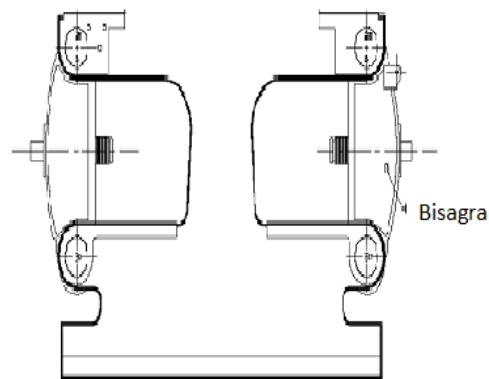
Fuente: elaboración propia.

2.11. Bisagras laterales

Las chumaceras de los molinos se mantienen retenidas sobre las guías de la virgen. Para que sea posible remover a las mazas, las chumaceras se restringen utilizando bisagras o tapaderas de acero.

Su función es soportar las reacciones de las fuerzas horizontales sobre las mazas inferiores y encierran los alojamientos de las mazas inferiores. Cada virgen tiene dos tapaderas cañeras y dos bagaceras que se sujetan a la virgen por medio de tornillos pasantes o con pasadores.

Figura 15. **Bisagras de un molino**



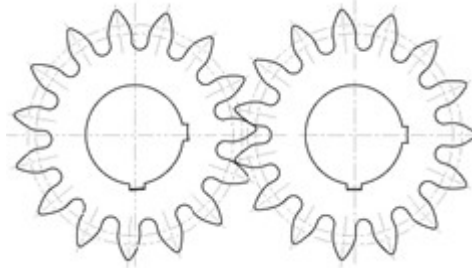
Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.12. Coronas

La entrada de potencia al molino se realiza a través del eje de la maza superior y es distribuida a los otros ejes de maza por medio de coronas. Las mazas cañera-bagacera son accionadas por coronas, que a su vez engranan con otra corona montada en la maza superior, de esta forma la maza superior mueve a las dos. La velocidad de rotación de los molinos varía entre 4 y 6 rpm.

Son lubricadas por aspersión o por baño con lubricantes sólidos (grasas) o lubricantes de tipo asfálticos (aceites) con el fin de prevenir el desgaste.

Figura 16. **Coronas de un molino cañero**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.13. Chumaceras o cojinetes

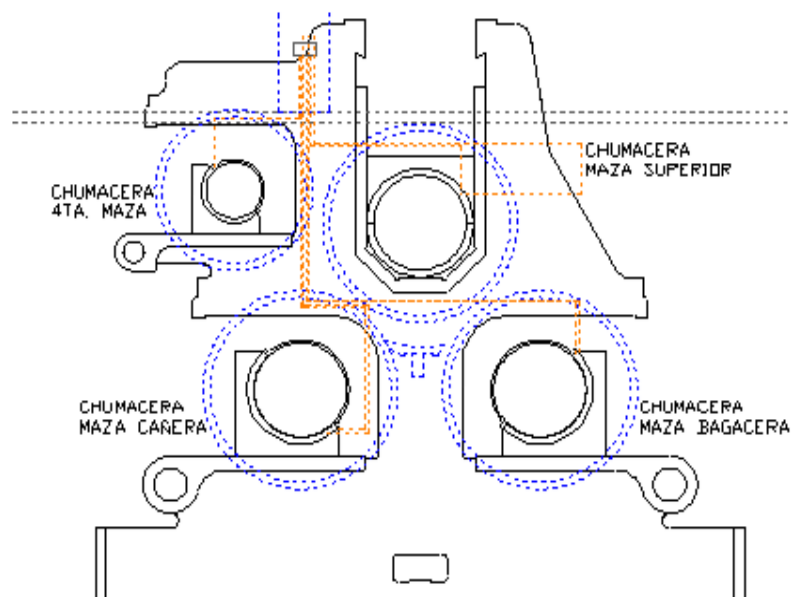
Son los soportes sobre los cuales se apoyan y giran los muñones de las mazas. Las chumaceras son robustas en su construcción y tienen en su interior canales por los que entra y circula agua que servirá para enfriamiento, absorbiendo el calor generado entre el eje, el lubricante y el bronce, derivado de las altas cargas al rotar las mazas.

Los cojinetes de las mazas cañeras y bagaceras pueden ser cuñados con calzos para ajustar su posición vertical. Algunos diseñadores de molinos inclinan la guía de las chumaceras de la maza superior hacia el lado de la alimentación para permitir que los hidráulicos actúen de manera más directa sobre la fuerza resultante.

Un molino convencional de 4 mazas posee un total de 8 chumaceras distribuidas de la siguiente forma: 4 del lado de la transmisión o también llamado lado corona y 4 del lado libre también llamado lado espiga.

El diseño de las chumaceras depende de dos factores: primero, el tamaño del muñón de la maza que soporta (definido por el largo y diámetro), y el segundo, por el lado en que se posicione dentro del molino, debido a que esto define la dirección de las tuberías de entrada de agua de enfriamiento.

Figura 17. **Disposición de las chumaceras en una virgen**



Fuente: ESTRADA MARROQUÍN, LUIS. *Mejoramiento del consumo de lubricantes por tonelada de caña molida de los sistemas de lubricación de chumaceras, en los molinos de los tándems A y B y plan de contingencia del Ingenio Santa Ana.* p. 24.

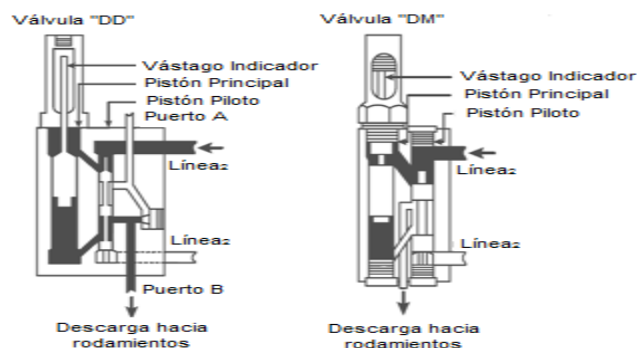
2.14. Equipos de lubricación

Para la lubricación de los muñones de las mazas y las coronas se utilizan equipos de lubricación centralizada con temporizador incorporado. Estos equipos consisten en: bomba, tubería de alta presión e inyectores graduables. Deben ser capaces de bombear a alta presión y en forma dosificada. Se calibra la dosificación de acuerdo con el rendimiento del lubricante y la carga del molino. Los lubricantes que se usan son fabricados especialmente para uso en molinos de caña.

2.14.1. Válvulas de lubricación

Son dispositivos utilizados para llevar volúmenes determinados de lubricante a los puntos de lubricación; están conformados básicamente por un pequeño bloque de acero que tiene recámaras en la parte inferior, en donde van alojados unos pistones, por los que inyectan lubricante hacia los muñones de las mazas y las chumaceras para evitar desgastes.

Figura 18. Válvulas inyectoras de lubricación “DM” y “DD”



Fuente: ESTRADA MARROQUÍN, LUIS. *Mejoramiento del consumo de lubricantes por tonelada de caña molida de los sistemas de lubricación de chumaceras, en los molinos de los tándems A y B y plan de contingencia del Ingenio Santa Ana.* p. 16.

2.15. Registros de enfriamiento

Son cajas de metal que van acopladas a las vírgenes; tienen en su parte superior las salidas de agua de enfriamiento provenientes de las chumaceras de las mazas superior, cañera, bagacera y cuarta maza y un drenaje común en la parte inferior para descargar el agua. Sirven para verificar el flujo normal del agua de enfriamiento y la temperatura que se encuentran; pueden variar en sus medidas y forma, dependiendo del molino en el que se requiera.

Figura 19. Registro de enfriamiento de un molino



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.16. Acoplamientos básicos para la transmisión de torque

La manera más común de propulsar el molino azucarero es a través de la maza superior y las coronas, como en los primeros molinos de tres mazas.

2.16.1. Acoples cuadrados

La unión entre el reductor de baja y el molino sigue siendo la parte más tradicional en la mayoría de los molinos azucareros, donde la unión o el acoplamiento se realiza por medio de un miembro intermedio (barra cuadrada y dos acoples cuadrados). Los ejes de las mazas, así como de los reductores, incluyendo los reductores más modernos vienen originalmente con las terminaciones cuadradas preparadas para usar los acoples tradicionales de la barra cuadrada.

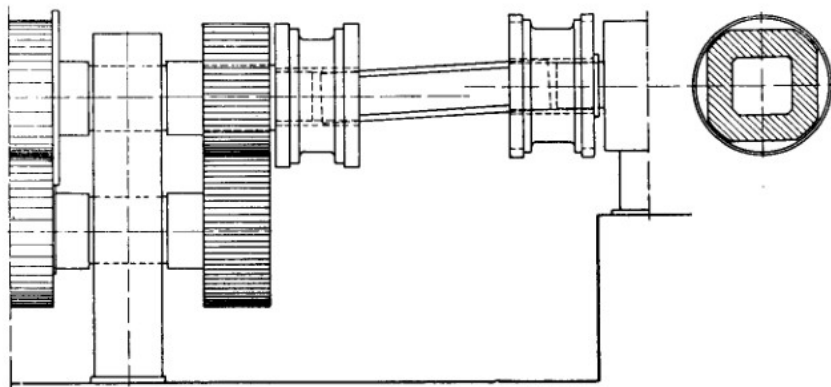
La potencia ingresa al molino por medio de un eje cuadrado llamado entre dos, este acople conecta el eje de salida de la última etapa de reducción de velocidad entre el motor eléctrico y el molino de caña, con el eje de la masa superior. El eje del reductor de baja es unido al entre dos por medio de un acople cuadrado y el entre dos es unido a un cuadrante del eje superior por medio de otro acople cuadrado.

Uno de los cuadrados (colocado generalmente del lado del reductor) está diseñado para funcionar como fusible (un limitador del torque rudimentario), rompiéndose en caso de sobretorque, protegiendo así las máquinas conectadas. Los acoples se fabrican de hierro fundido o de acero fundido con forma circular o cuadrada en su exterior y agujero cuadrado interior con 1/4" a 3/8" de holgura, sobre la sección de la barra.

Las desventajas principales de lo acoples cuadrados con la barra cuadrada son:

- Generan un empuje entre el molino y el reductor del accionamiento final, resultando en desgaste de los componentes del molino y fallas en los rodamientos del reductor.
- Aplican momentos de flexión sobre el eje del engrane, provocando desalineamientos de los dientes del engrane debido a los espacios libres en los rodamientos, lo que resulta en un deterioro prematuro y fallas.
- Son ineficientes y la pérdida de energía puede afectar el desempeño del molino cuando la energía disponible es marginal.
- Requieren de lubricación regular entre operaciones, costos significativos de reparación de los cuadrantes del eje entre zafras y, ocasionalmente, provocan incluso rotura del eje.

Figura 20. **Barra de acoplamiento y acoples cuadrados**



Fuente: HUGOT, Emile. *Manual para ingenieros azucareros*. p. 212.

2.16.2. Acoplamiento flexible

También conocidos como conversores oscilantes de torque, son los acoplamientos conocidos en la literatura técnica como acoplamientos con el miembro intermedio flotante. Los acoplamientos modernos utilizan las eslingas de poliéster y su diseño más nuevo contiene adicionalmente el mecanismo que permite pretensar las eslingas, transmitir el movimiento en caso del rompimiento de estas, como también el movimiento en reversa, y monitorear el desgaste de las eslingas.

En este acoplamiento el yugo propulsor y el propulsado están conectados con un elemento intermedio flotante por medio de eslabones rígidos y las rótulas, permitiendo eliminar con un solo acople los grandes momentos flectores. Este arreglo permite la compensación de amplio desalineamiento lateral, radial y empuje axial entre los ejes conectados, que puede ocurrir en caso del rompimiento del eje de la maza superior, protegiendo así el reductor del daño severo. Actualmente están equipados con el limitador del torque.

Figura 21. Acople flexible de eslingas



El uso de estos acoples ha mostrado tener un desempeño eficiente, con bajo mantenimiento, ya que el alineamiento entre la transmisión y el molino es bueno. Al utilizar eslingas de poliéster en lugar de cables de acero se logra superar la vida útil de estos acoplamientos cuando se tiene que absorber desalineamiento excesivo, debido a que las eslingas no necesitan flexionarse para absorber el desalineamiento, sino que solo se retuercen ligeramente.

El uso de este tipo de acoples permite una serie de ventajas sobre los acoples cuadrados:

- Compensa la falta de alineación entre ejes, proporcionando mayor fluctuación de la masa superior del molino.
- Extracción mejorada, especialmente si la potencia disponible es marginal.
- Absorben un pequeño porcentaje de la potencia transmitida.
- Humedad final más baja en el bagazo si se instala en el último molino.
- Reduce la fricción, rotura de ejes y tornillos de los cojinetes de accionamiento y también concentraciones de cargas en los accionamientos.
- Exhiben un mínimo desgaste.
- Protege el accionamiento en caso de ruptura del eje de la maza superior.
- Brinda protección contra sobretorque.
- Transmisión de torque casi puro con fuerzas axiales y radiales despreciables.
- Desgaste reducido en las chumaceras del molino.
- Menor consumo de energía.
- Ningún desgaste lateral de la cuchilla central, raspadores y mazas.
- Incrementa la vida de los reductores.
- Menor demanda de mantenimiento y por ende disminución del costo de mantenimiento.

2.17. Equipos de accionamiento para molinos cañeros

A continuación, se describen los diversos equipos para molinos caneros.

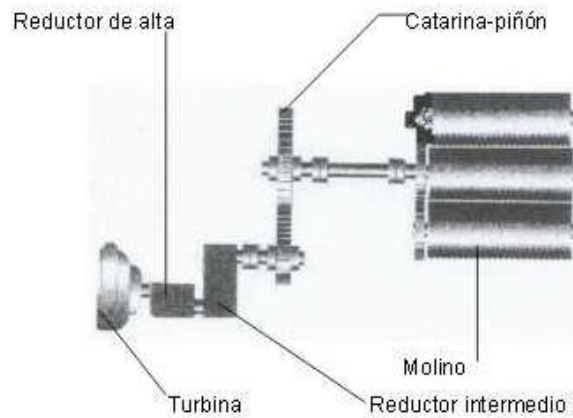
2.17.1. Turbinas de vapor

Una turbina de vapor es una turbomáquina que transforma la energía de un flujo de vapor de agua en energía mecánica. El vapor se genera en una caldera, de la que sale en condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica, que típicamente es aprovechada por un generador para producir electricidad, o para mover máquinas diversas tales como molinos, bombas, ventiladores, compresores, entre otros.

Las turbinas son máquinas de flujo permanente, en las que el vapor entra por las toberas y se expande hasta una presión más pequeña, de modo que el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Este vapor a alta velocidad es el que hace que los álabes móviles de la turbina giren alrededor de su eje al incidir sobre los mismos, ya que parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina.

Por lo general una turbina de vapor posee más de un conjunto tobera-álabe (o etapa), para aumentar la velocidad del vapor de manera gradual. Esto se hace ya que por lo general el vapor de alta presión y temperatura posee demasiada energía térmica y, si esta se convierte en energía cinética en un número muy reducido de etapas, la velocidad periférica o tangencial de los discos puede llegar a producir fuerzas centrífugas muy grandes causando fallas en la unidad.

Figura 22. **Sistema molino-turbina de vapor**



Fuente: RODRÍGUEZ OSORIO, Sergio. *Aplicación de sistemas electrónicos en el movimiento de molinos de caña utilizando motores hidráulicos y eléctricos AC.* p. 16.

2.17.2. Motores de corriente alterna (CA)

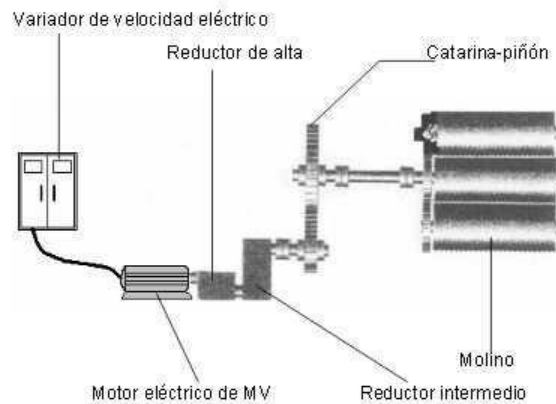
Se han usado máquinas de vapor para mover molinos de caña por más de 150 años. En 1925 se comenzaron a utilizar motores eléctricos para este servicio, pero siempre existió cierto desacuerdo respecto de sus ventajas y desventajas. Para aquel entonces se consideró que la mejor opción existente eran las turbinas de vapor. Una de las razones principales por la que se prefería la turbina de vapor sobre el motor eléctrico fue la ventaja que para aquel entonces presentaba de poder variar con facilidad la velocidad en un amplio rango.

Actualmente el accionamiento eléctrico más usado es el motor CA de inducción estándar con rotor jaula de ardilla; el problema de regulación de velocidad en motores eléctricos ha quedado resuelto con la aparición y desarrollo de los variadores de velocidad. Aunque en un principio estos variadores de velocidad fueron desarrollados para motores de baja tensión, actualmente se dispone en el mercado de variadores para motores de mediana y alta tensión.

Los motores totalmente cerrados se prefieren debido al polvillo y humedad en la atmósfera de los molinos; estos motores deben de ser ligeramente sobredimensionados debido a la pérdida de capacidad que es requerida para admitir calor adicional, generado por los variadores de frecuencia.

Como los molinos de caña están formados por equipo muy pesado, el motor eléctrico que se instala como unidad motriz es de alto caballaje para mediana tensión, y está fijado a un bancazo por medio de pernos. Está compuesto por un estator, un rotor que consta de un eje, con dos rodamientos o cojinetes (uno en cada extremo), en la parte frontal lleva un acople (engrane) y en la parte trasera un ventilador para evitar su calentamiento. El motor eléctrico hace girar las transmisiones de alta, media y baja, que transmiten movimiento al molino.

Figura 23. **Sistema molino-motor eléctrico**



Fuente: RODRÍGUEZ OSORIO, Sergio. *Aplicación de sistemas electrónicos en el movimiento de molinos de caña utilizando motores hidráulicos y eléctricos AC.* p. 25.

Las principales ventajas de los accionamientos eléctricos para molinos son:

- Eficiencia energética aproximadamente de 85 al 89 %
- Facilidad de operación.
- Reducción del mantenimiento.
- El torque puede ser limitado para proteger engranajes o permitir el uso de reductores cíclicos más eficientes.
- Limpieza y baja temperatura sin tuberías de vapor.
- Pueden utilizarse para el accionamiento independiente de las mazas del molino.
- El empleo de motores eléctricos en reemplazo de turbinas de vapor permite utilizar el vapor en aplicaciones propias del proceso productivo de la fábrica o para la generación de energía eléctrica.

2.17.3. Motores hidráulicos

El incremento de la capacidad de producción de un ingenio depende del aumento de la molida. La capacidad de molida está definida por el tamaño de los molinos y sus transmisiones de potencia. En el caso que se necesite aumentar la capacidad de las transmisiones de potencia de los molinos cañeros, tradicionalmente la primera opción que se contempla es la sustitución de las transmisiones en operación por otras de mayor tamaño, lo que implica un cambio completo del molino, incluyendo las bases.

Actualmente se puede utilizar tecnología alterna consistente en transmisiones hidrostáticas desarrolladas específicamente para aplicaciones en molinos cañeros. Para aumentar la capacidad del molino se incorpora al sistema tradicional un motor hidráulico, con la idea de quitarle parcialmente la carga a las transmisiones existentes, montando una transmisión hidrostática en una de las

mazas inferiores del molino, lo que se conoce como repotenciación, aumentando de hecho su capacidad.

Los motores hidráulicos convierten la energía operativa de un sistema hidráulico en energía mecánica rotativa. Estos operan creando un desequilibrio que resulta en la rotación del eje. Generalmente son utilizados de la marca *Hagglunds Drives*, en el que el motor se monta al eje de la masa cañera conducido por medio del eje hueco del bloque de cilindros.

La unidad de control consta de un motor (encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica) acoplado a una bomba hidráulica (encargada de suministrar al motor una presión de trabajo de 250 psi), un filtro en la línea de succión, uno en la de drenaje y uno en la línea de retorno.

2.18. Transmisiones para molinos cañeros

A continuación, se describen todos los elementos que intervienen en las transmisiones de molinos cañeros.

2.18.1. Reductores de velocidad

Un reductor es un conjunto de engranajes acoplados entre sí con la finalidad de disminuir gradualmente las revoluciones de entrada del motor y aumentar el torque hacia el eje de salida del reductor. Son conocidos como reductores de alta, media y baja velocidad.

Los reductores de alta y media velocidad son del tipo de transmisión encerrada, y los de baja velocidad son del tipo de transmisión abierta.

2.18.1.1. Reductores de alta

Constan de tres ejes y van colocados sobre cojinetes, dispuestos dentro de una carcasa en donde están alojados los engranajes y el lubricante.

En el Ingenio Santa Ana se utilizan los reductores Lufkin, con una capacidad de 1,795 revoluciones por minuto (rpm) a la entrada del piñón, un ratio de 5.194:1, una salida de 345.591 rpm. En su catarina tiene una bomba mecánica que está adaptada al eje de salida y es la encargada de distribuir la lubricación por medio de una flauta con cuatro boquillas aspersoras a los engranajes y cojinetes que están en cada extremo. El lubricante es enfriado por medio de un intercambiador de calor por el cual circula agua y este se encuentra en la parte inferior del reductor.

Figura 24. Reductor de alta Lufkin



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.18.1.2. Reductores intermedios

Los reductores intermedios son catarinas de ejes paralelos del tipo doble helicoidal (se usa este tipo de engranaje porque elimina el empuje axial que tiene los helicoidales simples a mayores velocidades y elimina el ruido que los mismos provocarían) de triple o cuádruple reducción.

Reciben 345,591 rpm en su entrada de piñón, provenientes del eje de salida del reductor de alta, con un ratio de 15,5714:1 y entregan 22,194 rpm a la salida, en cada extremo de eje del piñón llevan rodamiento (cojinete) que soporta altas cargas, mientras en el eje de la catarina tienen chumaceras de *babbitt*.

Figura 25. **Reductor intermedio**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

2.18.1.3. Reductores de baja

Ubicados en la última etapa de reducción, se les denomina transmisión de baja por sus bajas revoluciones por minuto y por las altas cargas que soporta.

Está compuesta de un conjunto de piñón y catarina. Esta reducción se caracteriza porque la relación del número de dientes de la catarina respecto del piñón es muy alta. La catarina y el piñón tienen engranes del tipo de dientes rectos con perfil de involuta; el piñón de entrada tiene un ratio de 3,33:1 y recibe 22,19 rpm, la catarina devuelve 6,665 rpm. Tanto los ejes del piñón como los de la catarina van anclados a unas chumaceras de *babbitt* (se usa este tipo de engranaje para velocidades medias y pequeñas y alta transmisión de potencia).

El piñón que recibe el movimiento del eje de baja del reductor de media velocidad, generalmente se construye de acero sólido con los dientes tallados en él y tratados térmicamente en relación con la dureza que presenten los dientes de la catarina (esa mayor dureza se debe a que trabaja a una velocidad mayor que la catarina).

Las catarinas, debido a sus grandes diámetros, son construidas en forma de araña o estrella; la maza donde va el eje se une al aro exterior en que se ubican los dientes por medio de brazos, conectando maza y aro. Otro tipo es el de placas, la maza se une al aro exterior por medio de dos placas de lámina.

Tanto los reductores intermedios como los reductores de baja (del tipo de transmisión abierta) utilizan sistemas de lubricación por medio de baño de aceite y algunos también utilizan aspersores conectados a un sistema centralizado de lubricación.

Figura 26. **Reductor de baja**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

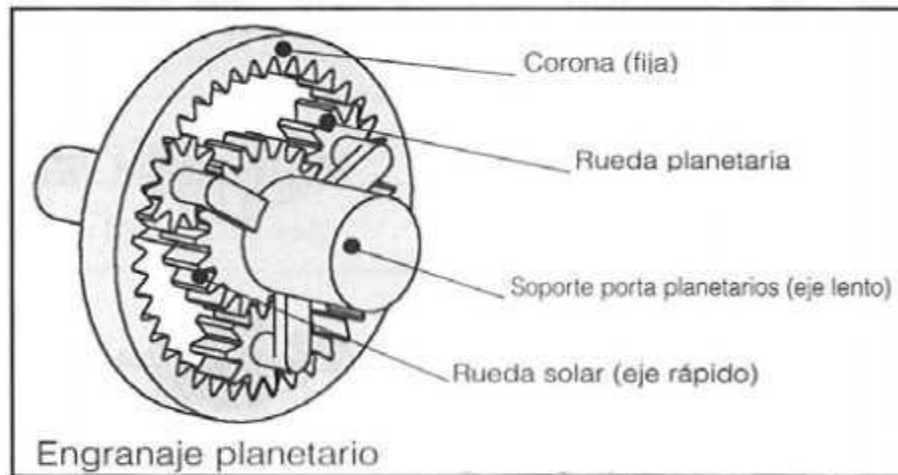
2.18.2. Transmisiones planetarias

Los mecanismos planetarios tienen como característica distintiva el movimiento de algunas de sus ruedas, conocidas como planetas o satélites, alrededor de otro denominado sol. Este movimiento describe una trayectoria circular equidistante del sol, lo que determina que los ejes de dichas ruedas sean móviles en relación con los ejes de las ruedas centrales (solar y anular o corona). En este caso, se plantea que el mecanismo tiene un grado de libertad en el plano.

Las relaciones de este tipo de mecanismos, en relación con los de ejes fijos son:

- Mayores relaciones de transmisión.
- Superior capacidad de carga por unidad de peso.
- Reducidas dimensiones.

Figura 27. **Vista interna de un sistema de engranajes planetarios**



Fuente: Catálogo empresa Cotransa. p. 4.

3. PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL EN LA ACTIVIDAD DE MOLIENDA Y ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS

3.1. Análisis de la operación y puntos críticos de control

A continuación, se describen los procesos de operación en la producción y los puntos críticos de control.

3.1.1. Tasa de producción

En el área de molinos la tasa de producción se determina a través de la razón de caña molida por hora, o sea el flujo de molienda; indica las toneladas de caña molida por cada hora transcurrida y existen dos formas de interpretarla: toneladas de caña molidas en una hora día calendario o toneladas de caña molida en una hora real de operación. En un tándem de molinos bien operado no deben presentarse pérdidas mayores al 1 % del tiempo de operación.

$$TROP = THC - TPOP$$

Donde:

TROP = tiempo real de operación

THC = tiempo de una hora día calendario programado

TPOP = tiempo perdido en una hora de operación

La hora calendario está definida como el tiempo teórico disponible para la molienda, que en el caso del ingenio es de 24 horas por día. En el tiempo perdido en una hora de operación se consideran las paradas por mantenimiento no programado, tales como paros de maquinaria o puenteo de molinos.

Además, se consideran las paradas por mantenimiento programado que están registrados dentro de las rutinas de mantenimiento y son efectuados periódicamente según un plan de mantenimiento semanal.

Es recomendable mantener una tasa de molienda constante con un sistema de nivelación de la caña, para que el colchón que pasa a través de los molinos sea lo más homogéneo posible, mantener una velocidad de rotación del molino estable y evitar que se presenten vacíos en el suministro de la caña.

El control de la alimentación de los molinos se realiza a través de tolvas de alimentación cerradas que están provistas de sensores de conductividad. Mediante la información brindada por dichos sensores se monitorearán los factores que definen la capacidad del tándem.

La capacidad de un tándem de molinos se define con base en los siguientes factores:

- La velocidad de los molinos: debe ser ajustada de acuerdo con el flujo de caña que proviene de las mesas de alimentación.
- La configuración del molino: conocida también en el ámbito de los ingenios como el “*setting*”.
- Las dimensiones de las mazas.
- Los sistemas de alimentación a la entrada del molino: mantener una velocidad de operación constante en los conductores intermedios garantiza una alimentación gradual a los molinos siguientes.
- La potencia del accionamiento.
- La rugosidad superficial de los dientes de las mazas: se define a través del chorreado adecuado.

- El rayado de las mazas y el sistema de drenaje (mejorado a través del empleo de mazas Lotus).

3.1.2. Pol en bagazo

La eficiencia de la caña molida se suele expresar como la relación del porcentaje total de la sacarosa contenida en el jugo exprimido en función del porcentaje de sacarosa que se pierde en el bagazo. Esta cifra se llama extracción de sacarosa.

La estructura de la caña de azúcar ejerce una influencia notable sobre los resultados obtenidos en el molino. Con procedimientos eficientes de molienda, ciertas cañas rinden bagazo que contiene 50 % de fibra y 45 % de humedad; otras cañas, al ser molidas en el mismo equipo, ajustado de la misma forma, y con eficiencia aparentemente igual, producen bagazo que contiene 45 % de fibra y 50 % de humedad.

Teniendo los pesos exactos de análisis de la caña y del agua de imbibición, y utilizando los métodos de análisis de guarapo, cuyo uso es generalizado en la actualidad, el parámetro de extracción de sacarosa (pol) es bastante aceptable para establecer la eficiencia de molienda de los equipos utilizados.

La extracción de sacarosa (pol) es afectada por el contenido de fibra, cuanto mayor sea la cantidad de fibra, menor será la extracción con la misma eficiencia de molienda. Las hojas adheridas y la parte superior y verde de los tallos (cogollos), que a veces se incluyen con la caña debido a descuidos en el trabajo de cosecha, aumentan la cantidad de fibra que tiene que pasar a través de los molinos y perjudican la extracción. Con fines de comparación las extracciones se consideran reducidas a un contenido de fibra de 12,5 %.

La manera de calcular los parámetros de extracción se detalla a continuación:

- Extracción de guarapo diluido (mezclado) % caña:

$$EGDm = \frac{\text{Peso de guarapo mezclado}}{\text{Peso de caña}} * 100$$

- Extracción de guarapo diluido (normal) % caña:

$$EGDn = \text{Extracción de guarapo diluido \% caña} - \text{dilución \% caña}$$

Con base en el análisis y peso del guarapo mezclado se calcula el peso de sacarosa (pol) en el guarapo mezclado; el peso del bagazo se calcula según la ecuación fundamental (caña + agua de imbibición = guarapo mezclado + bagazo), el peso de la sacarosa (pol) en caña está conformado por el peso de la sacarosa (pol) en guarapo mezclado + peso de sacarosa (pol) en bagazo, de lo que se deduce el parámetro de extracción.

Porcentaje de pol en bagazo:

$$\text{Pol \% en bagazo} = \frac{\text{Peso de sacarosa (pol) en guarapo mezclado}}{\text{Peso de sacarosa (pol) en caña}} * 100$$

Para mejorar el indicador de la pol en bagazo es necesario revisar la presión de los cabezotes, flotación de la masa superior, ajuste del “setting”, velocidad de molinos y aplicación de agua de imbibición, además de aplicar soldadura sobre las mazas para reparar el desgaste ocasionado por la operación.

3.1.3. Humedad en bagazo

La cantidad de agua existente en un biocombustible y más en uno como el caso del bagazo de la caña de azúcar afecta de forma decisiva su energía disponible. Puede considerarse que el agua existe en dos formas generales: agua libre y ligada.

El agua libre, que es la forma predominante, se libera con gran facilidad y es estimada en la mayor parte de los métodos usados para el cálculo del contenido en agua. El agua ligada se halla combinada. Se encuentra en los alimentos como agua de cristalización (en forma de hidratos) o ligadas a las proteínas. Estas formas requieren para su eliminación en forma de vapor un calentamiento de distinta intensidad. Parte de la misma permanece ligada al alimento incluso a temperaturas que lo carbonizan. En el proceso de molienda la humedad que se tratará de reducir al máximo será entonces la relacionada con el agua libre.

El bagazo contiene un elevado porcentaje de humedad que varía según la velocidad y la eficacia de la molienda, siendo el promedio de humedad de 48 % a 50 %.

3.1.4. Indicadores clave de desempeño

Son medidas cuantificables de gran importancia para el desarrollo de las actividades de producción. Estos indicadores varían dependiendo del ingenio, pero siempre deben, si se implementan y monitorean correctamente, ayudar a la empresa a definir y medir el progreso, enfocado en aclarar las metas y los objetivos.

En el caso del área de molinos, las variables a considerar como críticas para cuantificar el rendimiento del departamento y los indicadores de rendimiento utilizados para valorar las actividades complejas apegadas al plan estratégico organizacional son los siguientes:

3.1.4.1. Presión en los molinos

Esta presión es aplicada para mantener un colchón de bagazo adecuado en los molinos y con esto evitar el exceso de flotación de la masa superior; su importancia radica en:

- Tiene relación directa con la vida de los componentes de un molino, así como con la eficiencia del tándem.
- La fuerza hidráulica total de los cilindros se descompone en tres componentes sobre las mazas inferiores y sobre la cuchilla central. La reacción provocada evita la sobre flotación de la masa superior.

Para el control de esta variable es necesario considerar ciertas características:

- La extracción mejora al pasar de una presión menor a una mayor, disminuyendo a medida que se acerca a 2 222 psi.
- Una presión hidráulica mayor a 2 222 psi puede ocasionar problemas mecánicos serios y desgastes prematuros, obteniéndose poco incremento de extracción.
- La mayor presión hidráulica debe aplicarse siempre al primer y último molino de un tándem.
- Los molinos intermedios pueden trabajar entre 1 667 y 1 806 psi.

- La presión sobre la maza bagacera está entre 2 y 8 veces más que la presión sobre la cañera.
- Es recomendable trabajar los dos extremos del molino con la misma presión para evitar esfuerzos de fatiga por roturas de sellos.

3.1.4.2. Disponibilidad en los molinos

El control del parámetro de molienda es llevado a cada hora. Se configurarán las velocidades de los molinos tomando en cuenta el tipo de caña que está entrando en las mesas de alimentación, ya sea caña de corte manual o mecanizado,

Cuando se producen condiciones en el área de patio de caña que impiden el abastecimiento por medio de las mesas de alimentación, se hace necesario aplicar una molienda reducida, la que consiste en colocar la caña directamente en el conductor de tablillas, utilizando cargadores frontales. En este caso se bajan las velocidades de los molinos puesto que la velocidad del flujo de caña de entrada en los molinos disminuye; además se requiere un lavado manual, ya que es más probable que la caña contenga más piedras, tierra y basura provenientes del campo, lo que podría dañar los dientes de las mazas de los molinos.

El puenteo (*bypass*) en los molinos se realiza cuando en alguno de ellos se produce un problema que ocasione el paro del mismo durante la operación. Este consiste en detener completamente el molino a través de cerrar la compuerta del conductor intermedio que alimenta el chute del molino, y que la caña continúe su paso a través de una tolva de descarga hacia el siguiente conductor intermedio, durante el tiempo que sea necesario para efectuar las reparaciones pertinentes. En este periodo de tiempo la alimentación a los demás molinos es graduada a manera de evitar su embagazamiento.

3.1.4.3. Velocidad de los molinos

Es un factor de control muy importante que debe ser graduado de acuerdo con la cantidad de caña que ingresa al tándem de molinos. Existen rangos admisibles de trabajo para la rotación de las mazas: las consideradas como velocidades altas arriba de 7 rpm, las velocidades bajas de 4 a 5 rpm y las velocidades intermedias que rondan las 6 rpm. La velocidad del molino determina su capacidad, siempre que el contenido de fibra sea consistente.

Cuando se opera con velocidades altas se obtiene mayor capacidad de molienda para un determinado tamaño de molino y se presentan menores torques en las transmisiones, en los acoples y en las mazas de los molinos, pero debe monitorearse la velocidad, ya que puede producirse falta de tracción y patinamiento, además que la carga aplicada por los cabezotes hidráulicos se distribuya en un área más grande con menor intensidad.

En cambio, las velocidades bajas permiten aplicar mayores presiones efectivas y dan facilidad en el drenado del jugo, lo que significa que la extracción será mayor, con la condicionante que se pueden arriesgar los componentes mecánicos del molino y su transmisión, cuando la velocidad disminuye demasiado.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es que el diámetro de las mazas influye en la tasa de compresión del molino: entre mayor sea el diámetro la tasa de compresión será menor, lo que permitirá al molino operar a mayores velocidades superficiales, además de que la rugosidad de las superficies permite trabajar con velocidades altas.

3.1.5. Ajustes del molino

Durante la operación es preciso controlar que los molinos mantengan la configuración adecuada para su óptimo desempeño, con base en la razón de compactación según la programación de molienda diaria y la configuración del “*setting*”, que indica la holgura que debe permanecer para permitir el paso de la caña para su compresión en el molino. La configuración del “*setting*” se realiza de la siguiente forma:

3.1.5.1. Ajustes en las mazas del molino

- Mazas del molino: se determinan las dimensiones de las aberturas de trabajo del molino.
- Ajuste de entrada: entre la maza superior y la maza cañera.
- Ajuste de salida: entre la maza superior y la maza bagacera.

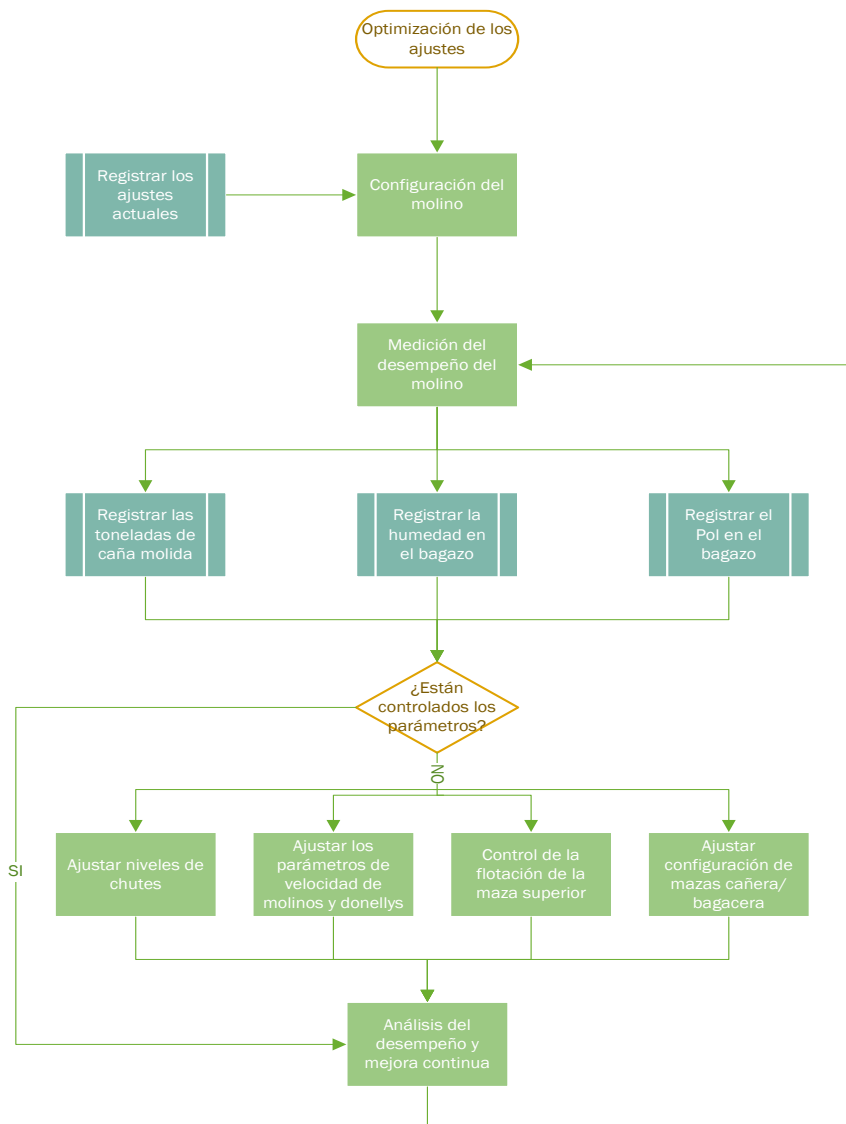
3.1.5.2. Ajustes por la flotación de la maza superior

La maza superior es levantada por el bagazo que pasa por debajo de ella, lo que se conoce como flotación de la maza bagacera, debido a que se levanta por encima de su posición de reposo. Las fuerzas que actúan para contrarrestar el colchón de bagazo son las del propio peso de la maza y la ejercida por los cabezotes hidráulicos.

El ajuste de las mazas debe realizarse con el molino libre de carga (aberturas más estrechas que las aberturas de trabajo). Durante la operación es controlado el pol y la humedad en el bagazo que sale hacia calderas. En caso que estos no se encuentren dentro de los parámetros admisibles establecidos, debe ajustarse nuevamente a sus valores de operación, programados cuando el

molino se encuentre en reposo, acorde a los paros programados para el mantenimiento preventivo del tándem.

Figura 28. **Diagrama de flujo para la mejora continua en los ajustes de un molino durante la operación**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio.

3.2. Cuantificación de pérdidas

“Las pérdidas en el bagazo representan el 25 % de todas las pérdidas en la fábrica”¹, y están afectadas por la estabilidad de la molienda en cuanto a la calidad y cantidad de caña, así como de la adecuada alimentación de caña a los molinos, una buena preparación, adición suficiente de agua de imbibición, la molienda acorde al “setting” del tándem y el estado físico de las mazas.

3.2.1. Pérdidas de azúcar en el bagazo

Las pérdidas de azúcar por tonelada de caña se cuantifican según la razón de la cantidad de pol contenida en el bagazo por tonelada de caña molida.

Para efectos de cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \frac{PB * \% Pol\ en\ bagazo * \frac{2,000lbs}{1\ Tc}}{TCM}$$

Donde:

P = pérdida de azúcar/tonelada de caña

PB = producción de bagazo

TCM = toneladas de caña molida

¹ REYES, Flavio. *Diplomado en ingeniería azucarera, módulo laboratorio azucarero patio de caña, molinos y calderas.* p.5.

Tabla I. Cálculo de pérdidas de azúcar en bagazo, cinco zafras más recientes. Ingenio Santa Ana

Zafra	Días de zafra	Total molida tándem A (Tc)	Producción de bagazo (Tc)	% pol en bagazo	% bagazo en caña	Pérdida de azúcar por hora (lbs/Tc)	Total pérdidas de azúcar (lbs)
2009 - 2010	171	1 681 003,27	477 068,73	1,91	28,38	10,84116	18 224 025,41
2010 - 2011	125	1 266 338.46	360 779,83	1,80	28,49	10,2564	12 988 073,78
2011 - 2012	149	1 558 532.50	418 465,98	1,61	26,85	8,6457	13 474 604,44
2012 - 2013	174	1 880 936.05	512 555,07	1,48	27,25	8,066	15 171 630,18
2013 - 2014	173	1 889 553.85	515 848,20	1,73	27,30	9,4458	17 848 347,76
Promedio	158,4	1 655 272,83	456 943,56	1,706	27,654	9,451012	15 541 336,31

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Pérdidas por puenteo de molinos

El puenteo permite continuar la molienda de caña si se tienen problemas en alguno de los molinos que integran el tándem. Dependiendo del molino que se encuentre puenteado, será el incremento de pérdida de azúcar en bagazo.

El primer molino y el último son los que provocan una mayor pérdida de azúcar al estar puenteados.

“Si se tiene una producción de 27 % de bagazo respecto de la caña inducida, el incremento de 0,3 % de pol de bagazo corresponde a una pol de caña de 0,08 unidades equivalente a 1,62 libras/tonelada de caña. Analizando el caso de la pérdida de azúcar por un molino puenteado, si se considera que un incremento de 0,5 % de pol de bagazo corresponde a una pol de caña de 0,135 unidades, equivalente a 2,70 libras/tonelada de caña”², es evidente que, a mayor tiempo perdido, mayor será la cantidad de azúcar perdida.

La siguiente ecuación se utiliza para el cálculo de pérdidas de azúcar por puenteo de un molino:

$$Pp = \% \text{ bagazo en caña} * \text{dif. pol en bagazo} * TCMh * Hpo * 20 \frac{qq}{1} \text{ ton}$$

Donde:

Pp = pérdida por puenteo de un molino (ton)

$TCMh$ = toneladas de caña molida por hora

Hpo = horas de puenteo

Si se considera un aumento promedio de pol por puenteo en el tándem A igual a 0,5, la pérdida por puenteo de molinos se calcula como sigue a continuación:

² REYES, Flavio. *Diplomado en ingeniería azucarera, módulo laboratorio azucarero patio de caña, molinos y calderas*. p. 6.

Tabla II. **Cálculo de pérdidas por puenteo de molinos, cinco zafras más recientes. Ingenio Santa Ana**

Zafra	Toneladas molidas/día tándem A (promedio)	Toneladas molidas/hora tándem A (promedio)	Total horas puenteo	Pérdidas de azúcar por una hora de puenteo
2009 - 2010	9 830,43	409,60	429,95	1 162,45
2010 - 2011	10 130,71	422,11	228,54	1 202,60
2011 - 2012	10 459,95	435,83	133,75	1 170,21
2012 - 2013	10 809,98	450,42	282,58	1 227,38
2013 - 2014	10 922,28	455,09	188,65	1 242,41

Fuente: elaboración propia

3.2.3. Poder calorífico del bagazo

El subproducto o residuo de la molienda de caña es el bagazo; una fibra leñosa que contiene la caña y que sale de los molinos unida al jugo residual y la humedad que queda del agua de imbibición. En la práctica, más o menos la mitad es fibra, y la otra mitad se compone de agua y sólidos solubles. Las porciones de estos componentes del bagazo varían según los procedimientos utilizados en la molienda y según la calidad y variedad de la caña molida.

El bagazo es un combustible natural aprovechado para producir vapor en las fábricas azucareras. Es de tamaño uniforme con longitud promedio de 5-7.5 cm. y no excede los 2 cm. de ancho. El rango de densidad varía entre 120-160 kg/m³. Consiste básicamente de fibra, agua, sólidos solubles y cenizas.

El bagazo también contiene elementos considerados como materia extraña, clasificados como: materia extraña mineral y vegetal. La primera está constituida por silicio, magnesio, calcio, sodio, potasio, óxidos de azufre, hierro, entre otros, y la segunda, por residuos de cosecha como hojas secas o verdes, cogollos, chulquines, lalas y cepas.

La composición química del bagazo que llega a las calderas es la siguiente:

- Carbono (23 %)
- Oxígeno (22 %)
- Hidrógeno (3 %)
- Cenizas (2 %)
- Agua (50 %)

El poder calorífico del bagazo que se quema en los hornos depende de la humedad que contiene, ya que requiere calorías para su vaporización. La temperatura de los gases de chimenea y el exceso de aire que entra en el horno y que hay que calentar constituyen otras variables. El hidrógeno existente en el bagazo forma agua, que absorbe también parte del poder calorífico.

El valor calorífico neto, también conocido como el valor calorífico inferior (LCV) supone que el agua formada por la combustión y el agua de constitución del combustible se mantiene en forma de vapor. En la práctica industrial no es factible reducir la temperatura de los productos de la combustión por debajo del punto de condensación para condensar la humedad presente y recuperar su calor latente, por lo tanto, el calor latente del vapor no está disponible para fines de calefacción y debe ser restado del valor calorífico superior (HCV).

4. FALLAS MÁS COMUNES EN LOS ELEMENTOS DE MOLINOS Y RUTINAS DE MANTENIMIENTO

4.1. Fallas en las chumaceras

Las fallas presentadas en las chumaceras que soportan las altas cargas a las que están sometidos los ejes de las masas son bastante comunes y las mismas podrían traer como consecuencia un aumento en los tiempos perdidos por mantenimiento correctivo.

El sistema de sellado para el diseño de las chumaceras disminuye notoriamente el desgaste producido entre el punto de aplicación de la carga y el muñón del eje de la maza, se mitigan los problemas de asentamiento de los bronce de las tejas y como resultado se evita tener que aplicar una recuperación de los ejes desgastados mediante soldadura.

Es necesario tener en cuenta que la presión máxima permisible para las chumaceras de bronce es usualmente de 9 a 11 MPa, dependiendo del diseño y la lubricación aplicada, debido a las altas presiones y bajas velocidades. El lubricante que se utilice debe ser de alta viscosidad y buenas características de fluidez; los aditivos de extrema presión deben estar incorporados, ya sea en aceites o grasas lubricantes.

4.1.1. Sobreflotación de la maza superior

La maza superior tiene que flotar a una altura determinada para permitir el paso de la caña (colchón de caña) y realizar la extracción del guarapo, pero si

los cabezotes no ejercen suficiente presión sobre la maza superior, esta va a flotar más de lo establecido, es más, si no lo hace de forma uniforme, se puede producir un desalineamiento, lo que va a provocar sobrecalentamiento y desgaste en las tejas.

4.1.2. Altas cargas/bajas velocidades

Las mazas son sometidas a cargas elevadas para mejorar la extracción del jugo, sobre todo en la maza superior. Esta carga favorece al rompimiento de la película de lubricante que existe entre las tejas y los muñones de las mazas, además las mazas giran a velocidades relativamente bajas de entre 6 y 7 rpm, dificultando que sean lubricadas adecuadamente.

4.1.3. Contaminación del lubricante

Un aspecto importante a considerar es la contaminación del lubricante. Los principales agentes contaminantes son: bagazo, polvo, cenizas, arena, sólidos abrasivos, agua y en algunas ocasiones otros lubricantes, lo que ocasiona que el aceite pierda sus propiedades y se degrade. El guarapo, por su alta acidez, tiende a lavar el lubricante y por lo tanto favorece el contacto de las superficies metálicas.

4.1.4. Lubricación inadecuada

Puede ser ocasionada por un volumen inadecuado de la película lubricante entre las superficies deslizantes o por no usar el lubricante adecuado, también al presentar fugas, suciedad o taponamientos en las líneas de suministro del lubricante.

4.1.5. Obstrucción de conductos

Se debe tener cuidado con los taponamientos de los conductos de flujo de lubricante y de agua de enfriamiento; estos deben estar despejados y limpios de manera que permitan la libre circulación del agua para que disipe de una mejor manera el calor.

Además, se debe tener agua de enfriamiento adecuadamente tratada con el fin de evitar la sedimentación en las paredes de los conductos y los consecuentes taponamientos.

4.1.6. Constantes paradas y puestas en marcha de las mazas

Cuando se realizan paradas constantes, el lubricante que queda entre el muñón de la maza y la teja de la chumacera en el área de mayor carga tiende a ser desplazado por el peso de las mazas, especialmente en paradas largas, reduciendo el espesor de la película de lubricante entre las dos superficies. En el momento de poner en marcha los molinos, la película suele ser tan delgada que se rompe, ocasionando un contacto metal-metal, desgastando ambas superficies.

4.2. Desalineamientos

Este es un factor crítico que provoca el incremento de la temperatura, y por ende un mayor desgaste y deterioro de las tejas de las chumaceras y del equipo en general. Todos los elementos del molino deben estar correctamente alineados, en especial mazas y chumaceras, ya que se considera que al manejar cargas altas un desalineamiento traería consigo un desgaste acelerado de los componentes.

La tasa de molienda puede ser un factor fundamental para la variación de las condiciones de operación de un molino, generando condiciones distintas a las previstas en los ajustes de los mismos. Esto provocará que el eje de la maza superior no esté alineado con el eje de salida de la transmisión, y como consecuencia, se generen sobreesfuerzos en el eje.

Existen fuerzas generadas en el eje de salida del reductor y el eje de la maza superior del molino; cuando esta última flota de la misma forma en ambos extremos, se desarrollan fuerzas y momentos que incrementan las cargas radiales. La forma más común de falla se da cuando la conexión entre el eje de salida del reductor y el eje de la maza superior están interconectados mediante un entredós.

Es necesario que cuando los molinos se encuentren trabajando en plena carga, el eje del reductor de baja y el de la maza superior estén alineados, para así evitar que se produzcan fuerzas y momentos flectores en los ejes del molino y del reductor.

Si el molino funciona por debajo del eje del reductor, el momento flector y la fuerza vertical que actúan en el extremo del eje disminuyen el efecto del momento flector generado por la acción del cilindro hidráulico. En cambio, cuando el molino funciona con el eje superior por encima del eje del reductor, el momento generado por la acción del cilindro es aumentado debido al generado por la fuerza vertical y el momento ocasionado por el acople.

El diseño del acople a colocar entre el eje de la maza superior y del reductor de baja es sumamente importante para que no introduzca cargas y momentos adicionales, problema que es evidente con el sistema entredós y acople cuadrado. Con el fin de disminuir los esfuerzos causados por el funcionamiento de los molinos es más conveniente incluir un diseño que permita eliminar los

grandes momentos flectores y la generación de empuje axial que normalmente resultan del desalineamiento axial y radial entre la transmisión y la maza superior. Este diseño coincide con los atributos de los acoples de eslingas.

El diámetro de los muñones es determinado con base en la necesidad de transmisión de potencia y resistencia a la flexión que se determinan para el molino, su longitud debe ser suficiente para limitar la presión sobre las chumaceras.

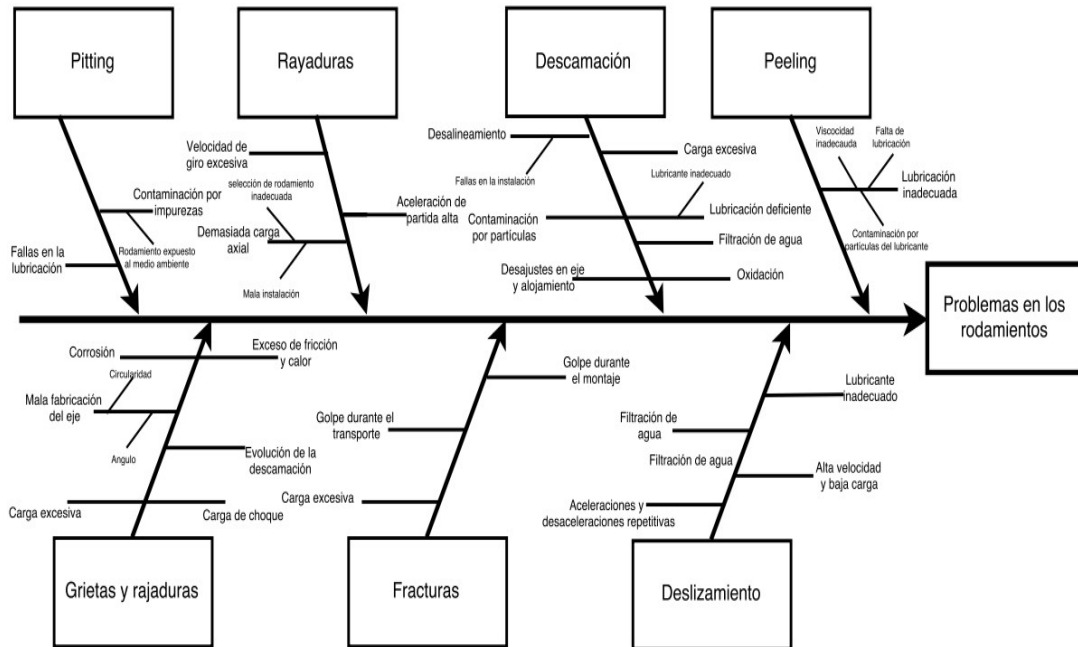
A medida que aumenta la longitud del muñón, aumenta el momento flector y así también los efectos en el desalineamiento de los ejes en operación, por lo tanto, debe cuidarse la dimensión que se le da al diámetro del muñón para restringir el movimiento axial de la maza.

4.3. Fallas en los rodamientos y cojinetes de los reductores de velocidad

Los rodamientos son elementos mecánicos utilizados en el sistema de transmisión de potencia del molino, con el objetivo de reducir la fricción entre los ejes y las piezas que se conectan al mismo, para facilitar el deslizamiento. Estos elementos mecánicos son considerados críticos, ya que una falla en cualquiera de los mismos puede ocasionar paros o puentes de algún molino, lo cual repercute en la eficiencia de la extracción.

Los problemas que se presentan en los rodamientos son diversos y es necesario ser cuidadosos a la hora de seleccionarlos e instalarlos para evitar daños durante la operación.

Figura 29. Diagrama de causa-efecto de los problemas en los rodamientos



Fuente: elaboración propia.

Durante la operación es recomendable hacer análisis de vibraciones a los rodamientos como parte integral del programa de mantenimiento, que permita tomar acciones prontas antes de que se presente alguna falla. A partir del establecimiento de una línea base de referencia de los decibeles para un funcionamiento normal, el análisis de vibraciones permite detectar el origen del impacto que afecta al elemento rotatorio.

En la figura siguiente se muestran los rangos recomendables de decibeles para identificar una falla y las acciones pertinentes para mitigar su impacto.

Tabla III. **Criterios para análisis de vibraciones**

Modo de falla del rodamiento	Decibeles sobre la referencia	Acción
Pre-falla o falta de lubricación	8 – 10 db	Lubricar y retomar las lecturas
Primeros síntomas o comienzo de la falla	10 – 12 db	Vigilar en el tiempo
Falla	16 db	Programar su reemplazo (próximo período conveniente)
Falla catastrófica	35 – 50 db	Remover y reemplazar de inmediato

Fuente: ESPINOZA, Fernando. *Ultrasonido: una técnica predictiva muy versátil en el mantenimiento*, p. 11.

4.4. Fallas en las transmisiones

Las transmisiones de velocidad del tipo abierto (compuesto de corona y piñón), además de ser los más baratos en cuanto a coste de fabricación y mantenimiento, son los que presentan mayor frecuencia de falla; por lo que se les debe controlar ciertos aspectos antes de que se presenten fallas mayores.

La pérdida de la geometría del diente se da por su desgaste progresivo, por falta de seguimiento y control durante la operación. Los más frecuentes son:

- **Desgaste abrasivo:** se presenta cuando existe contacto continuo con partículas sólidas presentes en el lubricante. El lubricante presenta partículas, viscosidad baja y alto torque que provocan contacto metal-metal. La dureza del diente es baja o existe diferencia entre la dureza de los dientes de la catarina y el piñón.

- Desgaste adhesivo: se evidencia cuando entre los dientes de los engranajes se transfiere metal a causa del contacto directo por rompimiento de la película lubricante.
- Desgaste por corrosión: se debe a la formación de una reacción química en el lubricante. Es evidente cuando existen picaduras sobre los dientes y es causado por contaminación del medio lubricante con algún químico o agua, cuando el aditivo anticorrosivo del lubricante es deficiente o no se utiliza el lubricante adecuado.
- Fatiga superficial: visible como forma de picado, es cuando existen pequeñas cavidades en los dientes a causa de la baja dureza de los mismos, cuando el lubricante no tiene la viscosidad adecuada o carece de un buen aditivo de extrema presión, o cuando el torque en operación es superior al máximo recomendado.
- Identación: es provocado cuando un material extraño entra en el espacio donde engranan los dientes, provocando que se destruya el perfil de los mismos o inclusive que se presente una fractura durante la operación.

Es recomendable evitar reparaciones de los dientes de los engranajes empleando soldadura, debido a que en estos existe una precisión dimensional que se debe guardar para mantener la uniformidad del diente.

Debido a estas reconstrucciones se pierde el tratamiento superficial del diente y su composición química, y se puede modificar la dureza de fábrica.

4.5. Fallas en los reductores

Los reductores del tipo cerrado están diseñados con base en un sistema de engranajes y permiten reducir velocidades altas provenientes directamente de los motores eléctricos, manteniendo una operación eficiente que transmite potencia y fuerza, pero durante su funcionamiento pueden presentar deficiencias tales como ruido, vibraciones y sobrecalentamiento.

El ruido y las vibraciones en las transmisiones son indicios de un desgaste anormal o una mala instalación que conducirá a una falla si no es tratada a tiempo. Es importante tener un especial control en la velocidad de rotación a la que opera el reductor, el tipo de engrane y condiciones de lubricación en la que se encuentra, el tipo de apoyo, estado de los cojinetes y acoplamientos, así como también la carga aplicada al reductor. Una vez identificada la causa debe programarse la reparación más eficiente que conduzca a la eliminación del fallo y a la vez que el coste económico sea mínimo.

4.6. Fallas en los ejes de las mazas

Las condiciones de operación de los molinos hacen que sus ejes presenten niveles críticos de esfuerzo y, por consiguiente, alto riesgo de falla. Factores como el desgaste producido en el muñón y funcionamiento, en condiciones tales que el eje del molino superior esté desalineado respecto del eje del reductor de baja, aumentan los esfuerzos generados en el escalón interno del muñón; zona que es considerada como crítica. Las fallas más frecuentes en los ejes de los molinos se presentan de la siguiente manera:

- Las fracturas en los ejes en servicio ocurren con más frecuencia cuando el eje está siendo utilizado como superior. El porcentaje de fallas de los ejes superiores es de 60 % del total de fallas.

- La posición más probable donde se puede presentar una fractura ocurre en el radio interno, en concordancia con el lado de entrada de potencia del rodillo, con una frecuencia del 42 %.
- La siguiente posición más probable de fractura ocurre en el lado próximo a la camisa del eje con una ocurrencia de 29 %.
- El promedio de edad en que un eje en servicio falla es 5,6 periodos de zafra.

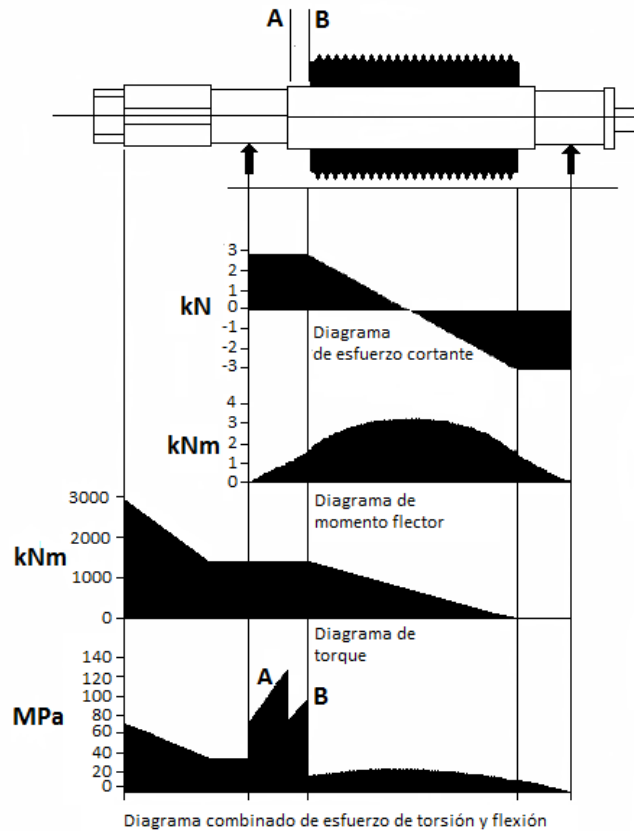
4.6.1. Torcedura de ejes

Las fuerzas que actúan en los ejes de las mazas dan lugar a que se produzcan cizallamientos, dobleces o esfuerzos de torsión y compresión. El eje de la maza superior es el que se encuentra bajo esfuerzos más elevados, ya que este consume alrededor de la mitad del torque total del molino, y está sujeto a doblamiento debido a las reacciones de la cuarta maza, cuchilla central y la maza cañera.

Para comprobar el estado de curvado de los ejes se colocan en el torno, se mide con reloj comparador (dial) y se calcula la deflexión máxima en el centro del eje, dependiendo de la longitud del mismo.

Con base en un análisis de deflexión mínima aceptable según los parámetros establecidos por el fabricante, se decide si se puede eliminar por maquinado o se descarta la continuidad de su uso.

Figura 30. Diagrama de esfuerzos para un eje de maza superior



Fuente: REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 110.

La figura anterior muestra cómo varían los esfuerzos a lo largo del eje, siendo el esfuerzo más importante el resultante de la combinación de los esfuerzos de torsión y flexión.

4.6.2. Desbalanceo

El desbalanceo se presenta como una fuente de vibración que afecta el adecuado funcionamiento de los ejes durante la operación, eleva el consumo energético y aumenta la probabilidad de falla en el acoplamiento con la

transmisión Generalmente se presenta en ejes torcidos y se genera por aplicaciones excesivas de torque, cuando existen fuerzas provocadas por la sobrecarga de caña en los molinos, cuando las vírgenes no se nivelan adecuadamente, provocando que al instalar el eje quede torcido concentrando fuerzas internas, y si el material con el que se fabrica el eje no es el adecuado para la operación.

4.6.3. Grietas y fracturas

En la mayoría de los casos la falla de los ejes de las mazas está asociada a un proceso de fatiga, en el que se destaca la iniciación de una fisura en una zona donde se presentan simultáneamente un alto nivel de esfuerzos y alguna característica que los intensifica (concentradores de esfuerzo).

Después de las fisuras se presenta un periodo de propagación de las mismas, ocasionado por la concentración de esfuerzos que se producen en la zona frente al vértice de la grieta y el cambio alternante de esfuerzo aplicado al eje. Este periodo se denomina “propagación suscrítica”. Ya que no es requerido que se alcance el esfuerzo último (σ_u) en toda la sección del eje, sino que, con bajos esfuerzos aplicados, el efecto concentrador del vértice de la fisura es suficiente para que en su vecindad se alcance el esfuerzo de ruptura y se produzca la propagación de la fisura.

Finalmente, se presenta una falla rápida causada porque la sección del eje ha sido reducida por la propagación suscrítica de la fisura, y la sección ya no puede soportar el esfuerzo aplicado. Esta parte del proceso de falla tiene como característica principal la presencia de una superficie de fractura frágil, a pesar de tratarse de un material dúctil.

Figura 31. **Superficie típica de falla por fatiga**



Fuente: RIVAS, Jhon; RODRÍGUEZ, Sara; CORONADO, John. *Análisis de la confiabilidad de los ejes de molino de caña de azúcar*. p. 46.

La zona crítica del eje se presenta en el escalón entre el muñón del lado de entrada de potencia hacia la camisa de la maza. La desalineación entre el eje superior y el eje de salida del reductor de baja, producido por la flotación del eje, aumenta significativamente el esfuerzo de flexión. El 42 % de las fallas de los ejes se presentan en esa zona. El porcentaje de fallas por otras zonas del eje es presentado en la figura siguiente:

Figura 32. **Porcentaje de incidencia de fallas en los ejes**



Fuente: RIVAS, John; RODRÍGUEZ, Sara; CORONADO, John. *Análisis de la confiabilidad de los ejes de molino de caña de azúcar*. p. 47.

La vida residual en función de la propagación de las fisuras sugiere que, ante este tipo de falla, la acción a considerar es que el eje sea bajado del molino para ser operado durante un tiempo como una maza inferior o bien como una cuarta maza antes de ser dado de baja.

El tiempo de vida útil de un eje se puede prolongar a través de mecanizar la zona de la fisura hasta encontrar el frente de grieta. Esta estrategia para enfrentar la presencia de fisuras es aplicada a ejes en todas las posiciones del molino.

4.7. Rutinas de mantenimiento predictivo

El desgaste y degradación en las regiones de esfuerzos y fatiga que existen en las transmisiones de los molinos se caracteriza por el apareamiento de defectos y discontinuidades exógenas y endógenas. Por esta causa, estos importantes componentes deben ser periódicamente evaluados a través de técnicas no destructivas, entre las cuales destacan los exámenes por magnetoscopia convencional o fluorescente y exámenes por ultrasonido, además de la inspección visual. Cabe destacar que estas rutinas de mantenimiento deben ser realizadas únicamente en época de reparación, puesto que en operación se hace imposible efectuarlas por la naturaleza de las instalaciones.

4.7.1. Ensayo por partículas magnéticas

El ensayo de magnetoscopia es usado para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Los defectos detectados con este tipo de ensayo son: grietas, juntas frías, inclusiones, gota fría, dupla laminación (en casos especiales), falta de penetración, doblamientos, segregaciones, porosidades, entre otros.

El método de ensayo está basado en la generación de un campo magnético que recorre toda la superficie del material ferromagnético; las líneas magnéticas del flujo inducido en el material alteran su trayectoria al encontrar una discontinuidad superficial o subsuperficial, creando así una región con polaridad altamente atractiva a las partículas magnéticas.

La inspección a través de partículas magnéticas se aplicará a las catarinas y piñones de las transmisiones de velocidad, además de todas las coronas titulares y de repuesto de los molinos; también se aplicará a los ejes de las mazas en los cambios de sección para detectar grietas; con base en los resultados de este análisis se determinará si están aptos para trabajar la siguiente zafra o si deben de ser descartados. Debe guardarse un historial de dichos análisis para la toma de decisiones futuras.

4.7.2. Inspección por ultrasonido

Dentro de los ensayos no destructivos, el ultrasonido es un medio que aprovecha las ondas ultrasónicas. El concepto en que se basa es el de la conversión de pulsos eléctricos a vibraciones mecánicas y el retorno de vibraciones mecánicas a energía eléctrica.

Este principio es el mismo que se emplea para generar sonido audible y consiste en aprovechar la propiedad que tienen algunos materiales ferromagnéticos de contraerse o expandirse en determinada dirección, cuando están sometidos a campos magnéticos. El método de generación de ultrasonido permite alcanzar frecuencias de hasta 25 MHz. El instrumento de medición contiene un elemento piezoeléctrico que convierte la señal eléctrica en vibraciones mecánicas (emisión) y las vibraciones mecánicas en energía eléctrica (recepción). En este ensayo se puede determinar la profundidad a la que se encuentra localizado el defecto de la pieza.

El ultrasonido es un método de detección segura y confiable, ya que es muy probable que detecte las fisuras que están presentes durante la inspección. El acero permite la propagación de las ondas ultrasónicas, que son vibraciones mecánicas. Para facilitar los diagnósticos, los resultados serán divididos en niveles de gravedad para calificar las discontinuidades como: alto, medio y de bajo nivel, indicando su posición y extensión.

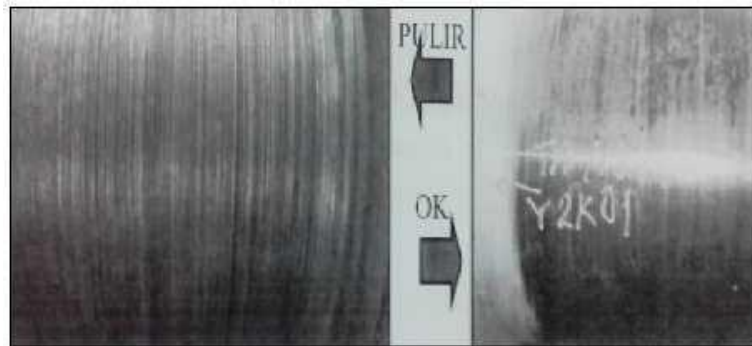
- Alto nivel: ejes con grietas mayores a 20 mm de profundidad.
- Medio nivel: ejes con grietas con profundidad de entre 15 y 20 mm.
- Bajo nivel: ejes con grietas menores de 15 mm de profundidad.

4.7.2.1. Preparación de los ejes para la inspección por ultrasonido

La inspección por ultrasonido en ejes de molinos y otros tiene por finalidad detectar discontinuidades existentes en el material, causadas en gran parte por fatiga del material durante las zafras. El procedimiento para la adecuada preparación de ejes es el siguiente:

- Destinar un espacio adecuado para los ejes que se vayan a inspeccionar.
- La superficie de los ejes debe estar en condiciones aceptables para mayor confiabilidad y repetitividad de los resultados (en la zona de inspección no debe estar rayado como resultado del servicio durante la zafra; en caso contrario debe de ser pulido de forma manual o en el torno).
- Ambos extremos (partes frontales) del eje deben estar lisos, sin restos de soldadura, cortes de soplete, deformaciones de esfuerzos, impactos y otros.

Figura 33. **Ejemplo de estado de un eje para la inspección**



Fuente: empresa M&M Labtest.

Las fisuras se forman como consecuencia de los esfuerzos en servicio; cuando las tensiones son cíclicas las fisuras son de fatiga. Más del 90 % de las fracturas de componentes mecánicos son por fisuras de fatiga.

La fatiga es entonces la degradación de las propiedades mecánicas de un material cuando es sometido a cargas cíclicas que lo conducen a una falla mecánica.

Las fisuras por fatiga se inician en la superficie del material debido a que los granos cristalinos que se encuentran en este lugar tienen menor restricción a la deformación plástica por acción de las cargas cíclicas y que inducen a la formación de planos de deslizamiento.

La nucleación es acelerada debido a factores como inclusiones no metálicas, porosidad acentuada, defectos de solidificación, formación de corrosión, entre otros.

4.7.3. Rutina de mantenimiento para las chumaceras de los molinos

A continuación, se enlistan las actividades de mantenimiento preventivo para las chumaceras de los molinos tanto en época de reparación como en época de zafra:

- Mantenimiento durante la época de reparación
 - Maquinar con pulidora de tejas hasta conseguir eliminar ralladuras en las chumaceras de los molinos.
 - Asentar las tejas de bronce en las cajas de acero.
 - Marcar la entrada y salida del lubricante en los extremos diametrales de la teja, dejando un canal para que el lubricante pueda llegar a las zonas de alta presión de manera uniforme.
 - Asegurarse de que las chumaceras queden lo más herméticamente posible, ya que si se filtra el agua de enfriamiento y se cuela hacia el muñón se afectarían las propiedades del lubricante.
 - No se recomienda hacer más ranuras para lubricación de las que trae la chumacera de fábrica, puesto que a mayor cantidad de ranuras disminuye el área de soporte y puede ocasionar que la teja se fracture.
 - Se debe chequear la nivelación y la alineación de las vírgenes (de forma paralela y cruzada) para evitar desgastes y roturas provocadas por el desplazamiento de las cargas, fugas de lubricante, sobrecalentamiento, fatiga en las tejas y desgaste en los muñones.
 - Verificar que el cilindrado y rectificado de los muñones sea lo más uniforme posible.

- Verificar el asentamiento de las chumaceras con los muñones de las mazas antes de instalar en el molino, mediante el empleo de líquido especial de asentamiento azul de Prusia.
- Evitar el uso de soldaduras para armado en las chumaceras, y de ser usadas, proteger perfectamente para que ninguna partícula quede entre la chumacera y el muñón.
- Mantenimiento durante la época de zafra
 - Verificar la libre circulación de las líneas de lubricación de las chumaceras.
 - Verificar el estado de los inyectores y que estos estén dosificando adecuadamente el lubricante.
 - Monitorear la programación de los periodos de lubricación de los sistemas de lubricación.
 - Verificar que el flujo de agua de enfriamiento en las chumaceras sea continuo.
 - Registrar tres veces al día (una vez por turno) la temperatura de trabajo de las chumaceras.

4.7.4. Rutinas de mantenimiento para los reductores de velocidad

En el caso de los reductores del tipo cerrado, estos deben estar debidamente sellados y emplearse únicamente el tipo de lubricante recomendado por el fabricante, que suele ser el más adecuado de acuerdo con la velocidad de trabajo, potencia y materiales con los que fueron construidos los engranes.

Seguidamente se enlistan las actividades para el mantenimiento de los reductores de velocidad.

- Mantenimiento quincenal programado durante la época de zafra
 - Revisar el nivel de aceite del reductor, revisar fugas y nivelar según sea requerido.
 - Revisar la alineación del motor y reductor.

- Mantenimiento durante la época de reparación
 - Revisión de engranes y piñones
 - Supervisar sistema de lubricación y sus conductos
 - Revisar conos
 - Revisar las cuñas (cambiarlas si es posible)
 - Revisar apriete del cono sobre la flecha
 - Ajustar las flechas del reductor

5. ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA ADQUISICIÓN DE UN NUEVO MOLINO

5.1. Preinversión (estudio técnico)

En el presente capítulo se presenta un estudio técnico respecto de la adquisición de un nuevo molino, tomando en cuenta la situación actual de todo el equipo.

5.1.1. Disposición actual del molino 6 tándem A

La disposición actual de las transmisiones en cada uno de los molinos que componen el tándem A, es como se muestra a continuación:

Tabla IV. Disposición actual del tren de reducción del tándem A

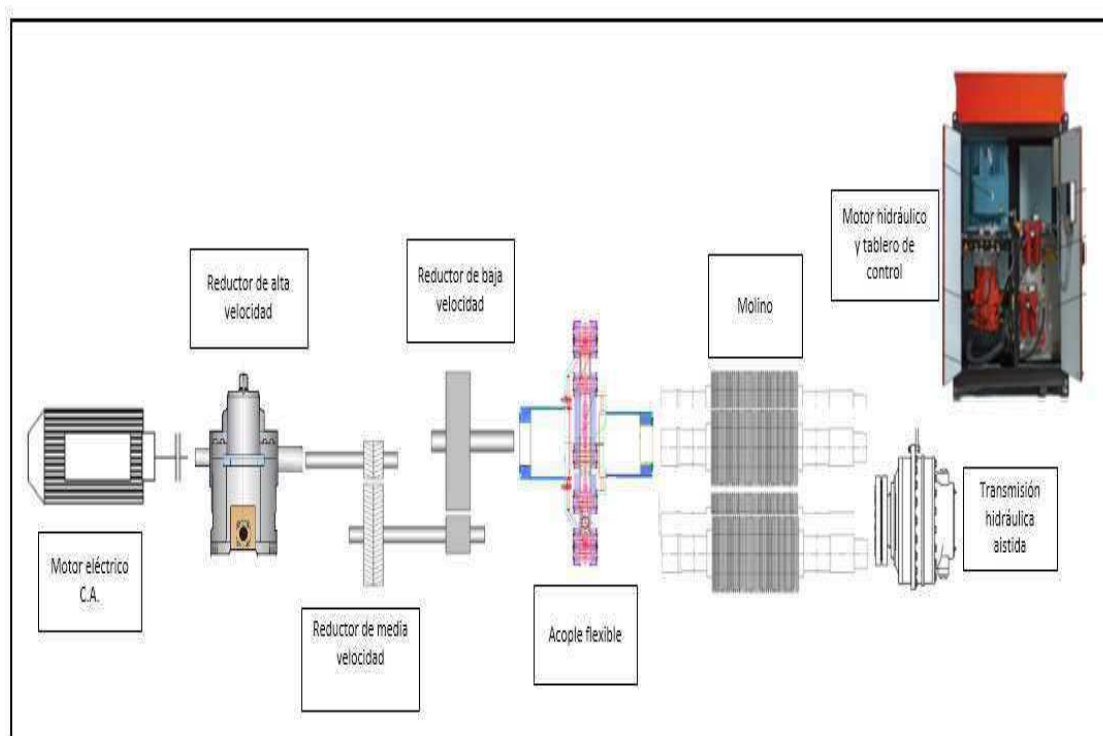
Molino No.	Dimensiones de mazas	Transmisión			
		De alta	Intermedia	De baja	Adicional
1	44"x84"	Reductor Lufkin	Reductor Lufkin	Catarina Piñón	
2	40"x78"	Reductor Lufkin	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	Motor Hagglunds en maza cañera
3	40"x76"	Reductor Lufkin	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	Reductor planetario maza cañera
4	40"x76"	Reductor Lufkin	Reductor Lufkin	Catarina Piñón	Reductor planetario maza cañera
5	40"x76"	Reductor Philadelphia	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	

Continuación de la tabla IV.

6	40"x78"	Reductor Lufkin	Catalina Herrinbone	Catarina Piñón	Motor Hagglunds maza cañera
---	---------	-----------------	---------------------	----------------	-----------------------------

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 34. Diagrama de transmisión de potencia actual del molino 6



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Dentro de las transmisiones se tienen clasificados dos grupos de equipos críticos: equipos con riesgo alto de falla por fatiga tales como el reductor intermedio y de baja del molino 6, y equipos con riesgo medio de falla por fatiga, como es el caso de los reductores del resto de molinos.

Tabla V. **Tren de reducción actual del molino 6**

Fuente	Ratio	rpm entrada	rpm salida
Motor eléctrico (1,250 hp)	----	-----	1795
Reductor de alta	5,194	1795,00	345,59
Reductor intermedio	15,5714	345,59	22,19
Reductor de baja	3,33	22,19	6,66

Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Análisis de potencia para molinos

La potencia absorbida por un molino depende de diversos factores. Entre los más importantes se pueden considerar:

- La potencia consumida por la compresión del bagazo.
- La tasa de compactación (potencia % fibra).
- La velocidad de molienda (potencia % velocidad x torque).
- La configuración del molino (número, tamaño y arreglo de las masas).
- La potencia consumida por acción de la fricción entre los muñones de los ejes y las chumaceras del molino.
- La potencia consumida por la fricción entre el bagazo y la cuchilla central.
- La potencia perdida por la fricción entre los peines raspadores y la punta de la cuchilla central contra los cilindros, a la que suma el trabajo de desprendimiento del bagazo en esos puntos.
- La potencia perdida por la presión de alimentación en el chute y el movimiento que se le da a los conductores intermedios.
- La potencia consumida por los engranes del molino.

- El método de molienda.
- La carga hidráulica en la maza superior (potencia y carga aplicada).

El proceso de molienda por el que pasa la caña en el tándem A está constituido por seis molinos, siendo en el primero donde se obtiene la máxima extracción del jugo con mayor contenido de sacarosa.

El último molino es también muy importante, debido a que es el paso final de la caña por el tándem, por lo que es un punto crítico clave para mejorar la eficiencia total del tándem A. De aquí la importancia de mejorar la capacidad instalada de este molino, ya que contribuye a minimizar las pérdidas de pol en el bagazo y a aumentar la eficiencia calórica del bagazo saliente hacia las calderas al disminuir su contenido de humedad. Por tal razón, estos molinos tienden a estar en rangos superiores de salida del orden de 10 a 13 kWh de potencia.

En la siguiente tabla se analiza el consumo de potencia de las transmisiones de los molinos 3, 4 y 5, que en la zafra 2012-2013 contaban únicamente con transmisión en el eje de la maza superior, en contraste con la zafra 2013-2014, cuando ya se utilizaron transmisiones asistidas del tipo planetario en las mazas cañeras, similares a las que se planea para el molino 6 en las mazas cañera y bagacera.

Tabla VI. **Consumo (kW) de las transmisiones**

Molino No.	Transmisión	Zafra 2012 - 2013	Zafra 2013 - 2014
3	Principal	376,03	321,93
	Asistida	0	65,42

Continuación de la tabla VI.

4	Principal	402,4	295,53
	Asistida	0	114,75
5	Principal	396,87	266,85
	Asistida	0	150,35
Consumo total		1 175,30	1 214,83
Promedio consumido transmisiones principales		391,77	294,77

Fuente: elaboración propia.

En la zafra 2012 - 2013 la carga promedio de las transmisiones principales de los molinos 3, 4 y 5 del tándem A fue de 391,77 kW. Para la zafra 2013 - 2014 la carga promedio consumida por los mismos molinos fue de 294,77 kW, lo que representa un porcentaje de disminución de carga del 24,75 %. Con base en los datos anteriores, se recomienda hacer uso de transmisiones asistidas para el nuevo molino.

Tabla VII. **Características de la transmisión actual del molino 6**

Potencia instalada	1 500 HP
Potencia consumida	1 250 hp
Velocidad de entrada (motor)	1 800 rpm
Velocidad de salida (reductor de baja)	5,5 - 7,5 rpm
Toneladas de caña molida por día (actual) (TCMDA)	10 500

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Con la información de la tabla anterior se calcula la potencia que está consumiendo cada molino por tonelada de fibra que sale. Si se consumen 1 250 hp de los 1 500 hp instalados, se tiene:

$$10,500 \text{ TCMD}/24 \text{ horas} = 437,5 \text{ TCMH} * 12,5 \% \text{ fibra} = 54,69 \text{ TFH}$$

$$1\,250 \text{ hp}/54,69 \text{ TFH} = 22,86 \text{ Hp (consumo actual por TF)}$$

Para la selección del reductor requerido en las mazas asistidas, se calcula la eficiencia actual utilizando motores eléctricos. La siguiente ecuación describe el cálculo de la eficiencia de la transmisión existente para todo el molino:

$$e_m = e_{mv} * e_{Rab} * e_{ec} * e_{Ce}$$

Donde:

e_{mv} = eficiencia motor eléctrico y variador velocidad

e_{Rab} = eficiencia reductor de alta + baja

e_{ec} = eficiencia engranes convencionales

e_{Ce} = eficiencia acoples de eslingas

$$e_m = 87 \% * 85 \% * 90 \% * 90 \% = 60 \%$$

La eficiencia total del sistema de transmisión existente es del 60 %; es decir que, de los 1 250 hp demandados por el motor eléctrico, solo 750 son utilizados efectivamente por el molino. Para calcular la eficiencia de las transmisiones asistidas en las mazas cañera y bagacera se utiliza ecuación siguiente:

$$e_m = e_{mv} * e_{Rp}$$

Donde:

e_{Rp} = eficiencia de reductor de engranajes planetario

$$e_m = 90 \% * 92 \% = 83 \%$$

Mediante el empleo reductores planetarios, las pérdidas de eficiencia se reducen a 17 %; es decir que de los 1250 hp que demanda el motor eléctrico en cada transmisión, son aprovechados 1 037,5 para el trabajo efectuado en los molinos.

Ahora bien, si se calcula la carga consumida con un reductor planetario, se tiene:

$$\begin{aligned} 10\,500\,TCMD/24\,horas &= 437,5TCMD * 12,5 \% = 54,69TFH \\ 750\,Hp/54,69TFH &= 13,71hp\,(nuevo\,consumo\,por\,TF) \end{aligned}$$

Con este nuevo consumo de potencia se obtiene un ahorro de energía igual a 40,02 %. Si se toma en cuenta un margen de seguridad de 1 hp, se considerará para la selección de los reductores una potencia de 14,72 hp por TF.

A partir de esto, se calculará la potencia adecuada que deberá tener el reductor planetario de la masa superior a un ritmo de molienda de 437,5 toneladas de caña molidas por hora y un porcentaje de fibra del 12,5%.

$$\begin{aligned} 10\,500\,TCMD/24\,horas &= 437,5\,TCMH \\ 437,5\,TCMH * 12,5 \% fibra &= 54,69\,TFH * 14,72\,hp = 805,04\,hp \end{aligned}$$

Por consiguiente, el consumo adecuado para la transmisión de la maza superior será de 805,04 hp.

Las mazas, cañera y bagacera, consumen cada una el 30 % del total de la potencia del molino, por lo tanto, la potencia estimada para estas transmisiones será de 241,51 hp. Considerando el margen de seguridad, según la disponibilidad de los reductores, se determina que es necesario un motor de 400 hp de potencia instalado para ambas mazas.

El motor eléctrico a instalar para el accionamiento de cada una de las mazas se ajustará en un rango de rotación de 5,5 a 7,5 rpm.

Tabla VIII. Características del motor eléctrico para la transmisión principal del nuevo molino 6

Descripción	Motor eléctrico de inducción trifásico, CA
Potencia	600 kW
Rotación	1,800 rpm
Carga	Continua
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	440 kW, CA.
Temperatura ambiente	40 °C
Dirección de rotación	Bi direccional
Cojinetes	Tipo antifricción

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Tabla IX. **Características del motor eléctrico para las transmisiones asistidas del nuevo molino 6**

Descripción	Motor eléctrico de inducción trifásico, C. A.
Potencia	300 kW
Rotación	1,800 rpm
Carga	Continua
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	440 kW, C.A.
Temperatura ambiente	40 °C
Dirección de rotación	Bi direccional
Cojinetes	Tipo antifricción

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Para controlar la velocidad de rotación del motor eléctrico se hace uso de una unidad de frecuencia variable (VFD por sus siglas en inglés), que debe ir en línea con los requerimientos para el motor eléctrico.

A continuación, se describen las características para el controlador de frecuencia.

Tabla X. **Características del variador de frecuencia para el motor principal del nuevo molino 6**

Calificación de controlador para motor CA	Adecuado para un motor de 600 kW
Tipo de control de motor	Control directo de torque
Rango de frecuencia estática	58-73 Hz
Voltaje de entrada	Trifásico
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	440 kW, C.A.
Temperatura ambiente	40 °C

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Tabla XI. **Características del variador de frecuencia para los motores asistidos del nuevo molino 6**

Calificación de controlador para motor CA	Adecuado para un motor de 300 kW
Tipo de control de motor	Control directo de torque
Rango de frecuencia estática	58-73 Hz
Voltaje de entrada	Trifásico
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	440 kW, CA
Temperatura ambiente	40 °C

Fuente: Ingenio Santa Ana.

5.1.3. Acople flexible de eslingas para el nuevo molino

El acople flexible será del tipo de desalineación múltiple con cuerdas de poliéster diseñado para la conexión de la conducción y mitades impulsadas

Tabla XII. Características del acople flexible para el nuevo molino 6

Equipo de conducción	Reductor planetario
Equipo accionado	Eje de maza superior
Distancia entre caras de frontales de cuadrados	Aprox. 1 200 mm
Elevación máxima de la parte superior de la maza superior	30 mm
Tamaño de cuadrados	425 mm
Diámetro del accionamiento oscilante de eslingas	Aprox. 3 200 mm

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Especificaciones técnicas del acople flexible reversible con eslabones:

- Acople flexible JPMA con sistema de brazo de acero de reversa para molino de 45"x90" fabricado en placas de acero de aleación SAE 516 con barra tubular de compresión.
- Eslingas de poliéster: compuesto de 8 eslingas operacionales externas y 4 de seguridad internas.
- Diseño de torque para una potencia de 1 250 hp.
- Potencia de operación del reductor 600 kW @ 6.10 rpm (1000 KNm)

- Material del cuerpo de la extremidad lado molino y lado reductor en acero ASTM A36, en espesores desde 1" hasta 2".
- Eslabones fabricados en acero fundido, normalizado y revenido.
- Yugo propulsor y propulsado en acero ASTM A36 en espesor a ¼".

5.1.4. Transmisiones planetarias para el nuevo molino

Para seleccionar el reductor idóneo destinado a una determinada aplicación es necesario conocer:

- La velocidad de entrada n_1 [rpm]
- La velocidad requerida en la salida n_2 [rpm]
- El par nominal en la salida T_{2n} [Nm]
- El par requerido en la salida T_2 [Nm]
- El factor de servicio f_s
- Relación de reducción (i)
- Condiciones de funcionamiento (naturaleza de la carga)

La elección del tamaño del reductor (también el del tren de engranajes y la relación de transmisión), se basa en n_2 , n_1 y a una potencia P_{n2} , igual o superior a $P_2 \cdot f_s$.

El factor de servicio es el que tiene en cuenta las distintas condiciones de funcionamiento (naturaleza de la carga, horas de funcionamiento y frecuencia de arranque) a las que puede ser sometido el reductor y que son necesarias para los cálculos de selección del mismo. Este coeficiente es un multiplicador del par requerido en la salida del reductor. De acuerdo con la máquina en la cual se aplica el reductor, se clasifica según las aplicaciones de servicio (uniforme, moderado o pesado). Se obtiene el valor del factor en la tabla correspondiente

Tabla XIII. **Factor de servicio para reductores planetarios en la industria**

Naturaleza de la carga de la máquina accionada		Duración del funcionamiento				
Ref.	Descripción	3.150 ≤ 2h/d	6.300 2h/d	12.500 4 h/d	25.000 8 h/d	50.000 16 h/d
a	Uniforme	0.8	0.9	1	1.25	1.5
b	Sobrecargas moderadas (1,6 veces la carga normal)	1.1	1.18	1.25	1.6	1.9
c	Sobrecargas fuertes (2,5 veces la carga normal)	1.4	1.6	1.7	2.12	2.5

Fuente: Catálogo empresa Cotransa. p.8.

Para el caso particular de la operación de los molinos azúcar que trabajan más de 16 horas diarias con fuertes cargas aplicadas ocasionalmente, se necesita de un reductor planetario con un factor de servicio que opere en el rango de 1,5 a 2,5.

5.1.4.1. Transmisión planetaria principal para el nuevo molino

En la transmisión principal se utilizará un reductor planetario helicoidal del tipo de eje montado, con eje de entrada circular sólido y eje macizo cuadrado de salida. La caja de engranes se acopla directamente al motor eléctrico. Para el caso de la transmisión principal del molino 6 se utilizará un reductor planetario marca Reggiana RR 110000 L3.

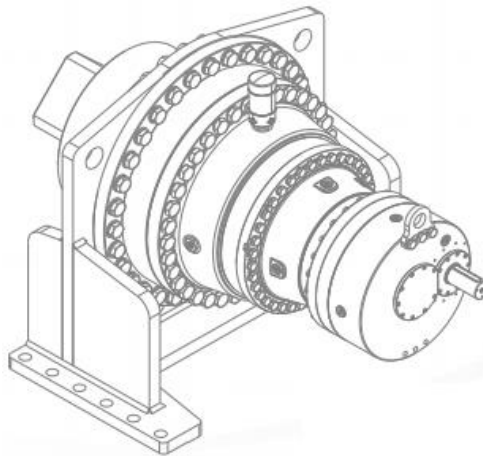
La transmisión estará acompañada de un sistema de lubricación basado en un PLC con dos juegos de bombas, motores y refrigeradores de aceite (un conjunto de trabajo y otro conjunto de espera), un panel de control y medidores de nivel. El diseño de la caja de reducción se basa en las normas DIN/AGMA.

Tabla XIV. **Especificaciones para el reductor planetario principal del nuevo molino 6**

Potencia a instalar (P_{inst})	600 kW
Velocidad de entrada n_1	1 800 rpm
Velocidad de salida n_2	6,1 rpm
Ratio del reductor	295.3:1
Factor de servicio	≥ 2.25
Torque de salida (T_{2inst})	1016,39 kNm
Vida de los rodamientos	$\geq 100,000$ horas

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 35. **Reductor planetario principal**



Fuente: *Catálogo empresa Reggiana Riduttori RR 110000*. p. 1.

5.1.4.2. Transmisiones planetarias asistidas para el nuevo molino

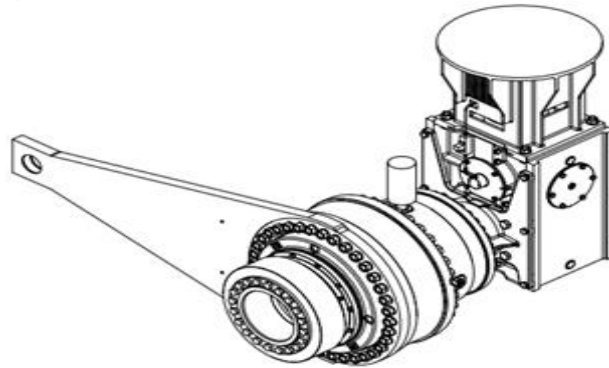
Las transmisiones de la maza cañera y de la maza bagacera serán conducidas por motores independientes de inducción de corriente alterna C.A. Los reductores planetarios serán del tipo de eje montado.

Tabla XV. **Especificaciones para los reductores planetarios asistidos del nuevo molino 6**

Potencia a instalar (P_{inst})	300 kW
Velocidad de entrada n_1	1,800 rpm
Velocidad de salida n_2	6,1 rpm
Ratio del reductor	295.3:1
Factor de servicio	≥ 2.25
Torque de salida (T_{2inst})	1016,39 kNm
Vida de los rodamientos	$\geq 100,000$ horas

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 36. Transmisión planetaria asistida



Fuente: Catálogo empresa Reggiana Riduttori RR 70000. p. 17.

5.2. Factibilidad del proyecto

Para el proyecto que se orienta a mejorar la productividad en el tándem A se analiza la opción descrita a continuación: compra de 3 reductores planetarios para las mazas superior, cañera y bagacera, en el molino 6.

Tabla XVI. Disposición modernizada del tren de reducción del tándem A

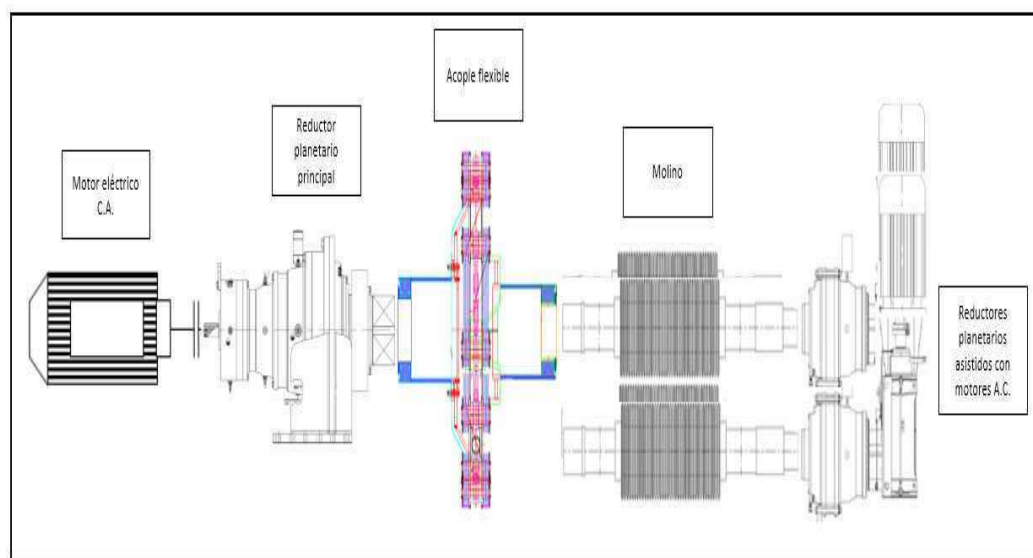
Molino No.	Dimensiones de mazas	Transmisión			
		De alta	Intermedia	De baja	Adicional
1	44"x84"	Reductor Lufkin	Reductor Lufkin	Catarina Piñón	
2	40"x78"	Reductor Lufkin	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	Motor Hagglunds en maza cañera
3	40"x76"	Reductor Lufkin	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	Reductor planetario maza cañera

Continuación de la tabla XVI.

4	40"x76"	Reductor Lufkin	Reductor Lufkin	Catarina Piñón	Reductor planetario maza cañera
5	40"x78"	Reductor Lufkin	Catarina Herrinbone	Catarina Piñón	Motor Hagglunds maza cañera
6	45"x90"	Reductor planetario			Reductores planetarios mazas cañera y bagacera

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 37. Diagrama de transmisión de potencia del nuevo molino 6



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Con base en la selección anterior de los componentes de molinos y de acuerdo con su capacidad máxima de diseño, se realizan los cálculos con los

parámetros de operación a utilizar para alcanzar velocidades intermedias en la salida del eje de la maza cañera y velocidades bajas en la salida de los ejes de las mazas superior y bagacera, logrando así un torque de trabajo óptimo en el molino, y consecuentemente una máxima extracción del jugo.

Tabla XVII. **Cálculo de la velocidad del tren de reducción del nuevo molino 6**

Fuente	Ratio	Rpm entrada	Rpm salida
Motor eléctrico superior	----	-----	1 500
Reductor planetario superior	288	1 500	5,20
Motor eléctrico de cañera	----	-----	1 750
Reductor planetario de cañera	272,3	1 750	6,43
Motor eléctrico de bagacera	----	-----	1 400
Reductor planetario de bagacera	272,3	1 400	5,14

Fuente: elaboración propia.

5.2.1. Análisis de costos por operar con un molino menos

Si se considera el aumento en la pol de bagazo por tener un molino fuera de operación como 0,5 y un costo por quintal de azúcar de \$. 16,70³, se tiene que el costo diario de operar con un molino menos es:

$$\begin{aligned}
 \text{Costo/día} &= \text{pérdida de azúcar} / \text{TCM} * \text{TCMD} * \text{precio de azúcar} / \text{qq} \\
 2,7 \text{ lbs azúcar} / \text{TC} * 10\,500 \text{ TC} / \text{día} * 1 \text{ qq} / 100 \text{ lbs} &= 283,5 \text{ qq/día} \\
 283,5 \text{ qq/día} * \$.16,70 / \text{qq} &= \$.4\,734,45 / \text{día}
 \end{aligned}$$

³ Banguat, precios a futuro mercado New York, para entrega en marzo de 2015.

Por el estado de las transmisiones se estima que, si llegaran a fallar durante la operación, la reparación podría durar 15 días, por lo que el costo para reparar las transmisiones sería de \$. 71 016,75.

Si se da el caso de que se produzca el rompimiento de un acople cuadrado y se deba poner fuera de línea al molino, se tendría una pérdida promedio de 1 201,01 libras de azúcar por hora y un tiempo medio por puenteo de 3 horas para reemplazar el acople, quedando así un porcentaje de utilización del 91,62 %. Se calcula el costo por puenteo de un molino, sabiendo que se rompe al menos un acople cuadrado durante la zafra:

$$\begin{aligned} \text{Costo/puenteo} &= qq \text{ azúcar/hora} * \text{horas/puenteo} * \text{precio de azúcar/qq} \\ 1\ 201,01 \text{ lbs} &\text{ lbs azúcar/hora} * 3 \text{ horas} * 1 \text{ qq/100 lbs} = 36,03 \text{ qq azúcar} \\ 36,03 \text{ qq azúcar} &* \$.16,70/\text{qq} * 0,9162 = \$.551,28 \end{aligned}$$

5.2.2. Análisis de costos para mantener el molino actual de 40"x78"

Para poner el molino actual de 40"x78" en óptimas condiciones de funcionamiento son necesarios algunos desembolsos de efectivo. A continuación, se detallan algunos costos proyectados:

Tabla XVIII. Costos por mano de obra (US\$)

Puesto	Horas/hombre	Costo/hora	Costo total
Mecánico especializado	362,50	2,69	975,125
Soldador especializado	494,96	2,69	1,331,44
Mecánico de primera	310,94	2,16	671,63
Tornero de primera	136,00	2,16	293,76

Continuación de la tabla XVIII.

Tornero de segunda	41,93	2,04	85,54
Ayudante	658,20	1,54	1 013,62
Costo total			4 371,12

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Costos por reparación de las mazas (US\$)**

Descripción	Costo/hora	Horas	Cantidad utilizada	Costo unitario	Costo total
Disco de pulir 1/4" x 7/8" x 9"			440	3.77	1 658,80
Electrodo azúcar 80 5/32"			800	4.22	3 376,00
Costo rectificado de mazas	53.37	180			9 606,60
Costo total					14 641,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Costos por reparación de las coronas (US\$)**

Descripción	Cantidad utilizada	Costo unitario	Costo total
Electrodo 90 5/32" Arc-Weld	100	3.13	313.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Costos por reparación de las chumaceras (US\$)**

Descripción	Cantidad utilizada	Costo unitario	Costo total
Electrodo 5/32" 32 UTP	160	20,00	3 200,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Costos por reparación del guardajugos (US\$)**

Descripción	Cantidad utilizada	Costo unitario	Costo total
Lamina Inoxidable 304 1/2"	40	50,71	2 028,40

Fuente: elaboración propia.

Por las condiciones de los elementos básicos del molino de 40"x78", se considera la adquisición de repuestos por seguridad, como se muestra a continuación:

Tabla XXIII. **Costos de repuestos por seguridad (US\$)**

Elemento	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Maza superior	1	36 850,57	36 850,57
Corona	1	1 818,26	1 818,26
Tejas	6	553,82	3 322,92
Acople cuadrado	1	3 750,00	3 750,00
Peine doble hierro gris 78"	1	837,05	837,05

Continuación de la tabla XXIII.

Peine fundido hierro gris 78"	1	703,13	703,13
Cuchilla central hierro fundido 78"	1	758,93	758,93
Cuchilla 4ta. maza 78"	1	450,34	450,34
Costo total			48 491,20

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior, se tiene que los costos totales por mantener el molino de 40"x78" son de \$. 73 045,12, el costo total para el mantenimiento mayor del sistema de transmisión completo tendría un costo total de \$. 270 000,00.⁴

5.2.3. Cálculo económico del ahorro por sustitución del molino

Con el uso de un molino de mayores dimensiones se busca disminuir el pol a la salida del mismo. Como la extracción en los molinos depende en gran medida de la velocidad a la que giran las mazas, teniendo en consideración los valores de operación descritos con anterioridad, se determinará el ahorro monetario que representaría la utilización del molino de 45"x90".

5.2.3.1. Ahorro por recuperación de azúcar

Para saber cuál es la recuperación de azúcar si se sustituye el molino número 6 por uno nuevo, se determinará el pol a la salida de ambos. Para esto se comenzará con el cálculo de la velocidad tangencial a la que gira la masa superior en el molino de 40"x78":

⁴ Ingenio Santa Ana, costo estimado del mantenimiento mayor del sistema de transmisión para el molino 6, reparación 2013.

$$v = \omega * r$$

Donde:

$v = \text{velocidad tangencial}$

$\omega = \text{velocidad angular}$

$r = \text{radio de la maza}$

$$v = 6,66 \text{ rpm} * 2\pi \text{ radianes} / 1 \text{ revolución} * 40 \text{ pulg} / 2 * 1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg}$$

$$v = 69,74 \text{ pie/min}$$

Si la maza cañera se hace girar a un máximo de 7,33 rpm, su velocidad tangencial es:

$$v = 7,33 \text{ rpm} * 2\pi \text{ radianes} / 1 \text{ revolución} * 40 \text{ pulg} / 2 * 1 \text{ pie} / 12 \text{ pulg}$$

$$v = 76,76 \text{ pie/min}$$

Teniendo las velocidades tangenciales a las que giran las mazas, superior y cañera, se calcula la velocidad lineal media a la que fluye el bagazo entre las dos mazas durante la compresión:

$$v = \frac{(69,74 + 76,76)}{2} \text{ pie/min}$$

$$v = 73,25 \text{ pie/min}$$

Se calcula el pol a la salida de un molino de 40"x78" con una fibra de caña de 12,5 % de la siguiente manera:

$$Pol_f = \frac{TCD}{0,5 * fp * nc * l * v * (12,5/fi) (13,0/Pol_c)(lf/200)}$$

Donde:

$fp = \text{factor de preparación} = 1.25$

$nc = \text{número de compresiones} = 4$

$l = \text{largo de las mazas} = 6,5 \text{ pie}$

$v = \text{velocidad de flujo de bagazo} = 73,25 \text{ pie/min}$

$fi = \text{fibra de caña} = 12.5$

$Pol_c = \text{pol inicial} = 2.54$

$lf = \% \text{ de imbibición} = 200$

$$Pol_f = \frac{10,500 \text{ Tons}}{0,5 * 1,25 * 4 * 6,5 \text{ pie} * 73,25 \text{ pie/min} (12,5/12,5) (13.0/2.54) (200/200)}$$

$$Pol_f = 1,72$$

Si se sustituye el molino por uno de 45"x90", se calcula la velocidad tangencial a la que giraría la maza superior:

$$v = 5,2 \text{ rpm} * 2\pi \text{ radianes/1 revolución} * 45 \text{ pulg}/2 * 1 \text{ pie}/12 \text{ plg}$$

$$v = 61,26 \text{ pie/min}$$

La velocidad tangencial para la maza bagacera será la siguiente:

$$v = 6,43 \text{ rpm} * 2\pi \text{ radianes/1 revolución} * 45 \text{ pulg}/2 * 1 \text{ pie}/12 \text{ plg}$$

$$v = 75,75 \text{ pie/min}$$

La velocidad media a la que fluiría el bagazo será de:

$$v = \frac{(61,26 + 75,75)}{2} \text{ pie/min}$$

$$v = 68,50 \text{ pie/min}$$

Si se mantiene una fibra de caña de caña de 12,5 %, un pol inicial de 2,54 y un porcentaje de imbibición de 200, se obtiene el pol a la salida de la siguiente manera:

$$Pol_f = \frac{10,500 \text{ Tons}}{0,5 * 1,25 * 4 * 7,5 \text{ pie} * 68,50 \text{ pie/min} (12,5/12,5) (13,0/2,54) (200/200)}$$

$$Pol_f = 1,59$$

La diferencia de pol obtenida, si se considera el cambio del molino de 40"x78" por uno de 45"x90", es de:

$$\Delta Pol = 1,72 - 1,59$$

$$\Delta Pol = 0,13$$

La recuperación en quintales de azúcar debido a la diferencia de pol es:

$$R = TBH \times TCMH \times \Delta Pol$$

$$R = 118,13 \text{ TBH} \times 437,5 \text{ TCMH} \times 0,13 \% \times 20 \text{ qq/1T}$$

$$R = 2,96 \text{ qq azúcar/hora}$$

Entonces, en una operación de 24 horas se recuperan 71,04 quintales de azúcar cada día.

Para una zafra de 180 días, se calcula el ahorro que se tendrá por la recuperación del pol con el nuevo molino:

$$Ahorro = 71,04 \text{ qq azúcar/día} \times 180 \text{ días} \times \$16,70$$

$$Ahorro = \$ 213\,546,24/\text{zafra}$$

Este cálculo no considera una disponibilidad del 100 % del tiempo del molino, ya que en las fórmulas previas se ha considerado un porcentaje de disponibilidad del mismo, tomando en consideración las paradas y tiempos perdidos en su utilización.

5.2.4. Venta adicional de energía por disminución de la humedad en el bagazo

Al mejorar el proceso de compactación de la caña se garantiza una disminución en la humedad final con la que el bagazo es enviado hacia las calderas. Si con el nuevo molino se logra una disminución en la humedad del bagazo de 0,3 %, se calculan los BTU/lb para los valores de referencia porcentual como se muestra a continuación:

Tabla XXIV. **Cálculo del poder calorífico del bagazo según su humedad**

Equipo	Humedad	HCV (BTU/lb)	LCV (BTU/lb)
Molino 40"x78"	50	3 774,06	2 974,09
Molino 45"x90"	49,7	3 799,39	3 000,93
Diferencia	0,3		26,84

Fuente: SUGARTECH. <http://www.sugartech.co.za>. Consulta: diciembre de 2015.

Considerando la molida por hora del tándem A de 437,5 TCH, un porcentaje de bagazo en caña de 27 % y una producción de bagazo de 118,13 Ton/hora, se calculan los BTU por diferencia de humedad:

$$BTU_{dif} = TBH * dif. humedad * 2\,000\ lb$$

$$BTU_{dif} = 118,13\ Ton/h * 26,84\ BTU/lb * 2\,000\ lb$$

$$BTU_{dif} = 6\,341\,093,27\,BTU$$

Si se tiene una eficiencia de 9 722 BTU/Kw, se calculan los Kw/hora generados por la diferencia de humedad:

$$Kw/h = BTU_{dif}/eficiencia$$

$$Kw/h = 6\,341\,093,27\,BTU/9\,722\,BTU/Kw/h$$

$$Kw/h = 652,24$$

Considerando un precio de venta de \$. 0,15/Kw/h, la energía recuperada en un periodo de zafra es:

$$$/zafra = 652,24/Kw/h * 24\,h * 180\,días * \$\,0,15\,Kw/h$$

$$$/zafra = \$\,422\,651,52$$

5.2.5. Costos por consumo energético del nuevo molino 6

En consideración con las potencias de operación consumidas por los nuevos motores, se calcula el costo energético que tendrían estos componentes durante un periodo de zafra de 180 días.

Tabla XXV. Estimación de costos energéticos del nuevo molino 6

Motor	Potencia kW	Horas/ zafra	Energía (kW/h/zafra)	Costo (US\$)	
				(kW/H)	Total
Maza superior	500	4 320,00	2 160 000,00	0,03	64 800,00

Continuación de la tabla XXV.

Maza cañera	150	4 320,00	648 000,00	0,03	19 440,00
Maza bagacera	150	4 320,00	648 000,00	0,03	19 440,00
Costo total					103 680,00

Fuente: elaboración propia.

5.2.6. Análisis FODA para la adquisición de otro molino

El análisis FODA consiste en detectar cuáles son las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de un evento o empresa, para para reorientar todas las actividades a partir de lo que ya se conoce.

Tabla XXVI. Análisis FODA para la adquisición de un nuevo molino

Fortalezas	Oportunidades
• Mejora en la eficiencia del proceso de extracción (disminución del pol y la humedad en el bagazo). • Mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo. • Reducción de tiempos perdidos. • Reducción de costos por mantenimiento. • Disminución del consumo energético.	• Incremento en la capacidad de molienda. • Aumento de la producción de azúcar en el Ingenio. • Mayor participación en cuotas de producción de azúcar en el mercado nacional e internacional. • Capacidad de generar y colocar más energía en el mercado eléctrico nacional.

Continuación de la tabla XXVI.

Debilidades	Amenazas
• Costos de inversión e instalación elevados. • Necesidad de adecuación de equipos y maquinaria.	• Dificultades de importación del molino en aduana. • Atrasos en los tiempos de instalación.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Detalle del presupuesto para el proyecto (US\$)**

Descripción	Costo
Un reductor planetario para maza superior	245 000,00
Dos reductores planetarios para mazas inferiores	269 000,00
Dos variadores para reductores planetarios de mazas inferiores	214 500,00
Un acople flexible	135 000,00
Molino de 45"x90"	553 500,00
Cimentación y montaje	70 000,00
Repuestos por seguridad	18 562,50
Subtotal	1 635 500,00
Imprevistos (10 %)	163 550,00
Costo total del proyecto	1 799 050,00

Fuente: elaboración propia.

Para la proyección de costos de mano de obra del personal de mantenimiento que requerirá el nuevo molino, se estima que será necesaria una menor cantidad de personal especializado.

Tabla XXVIII. **Proyección de costos para mantenimiento del nuevo molino 6 (US\$)**

Puesto	Horas /hombre	Costo/hora	Costo total
Mecánico especializado	8	2,69	21,52
Soldador especializado	216	2,69	581,04
Mecánico de primera	462	2,16	997,92
Tornero de primera	691	2,16	1492,56
Tornero de segunda	174	2,04	354,96
Ayudante	456	1,54	702,24
Costo total			4 151,27

Fuente: elaboración propia.

5.2.7. Análisis financiero

El cálculo de flujo de ingresos y egresos del proyecto se realizará tomando en consideración un factor de inflación del 4,24 %⁵, un aumento del costo anual de la mano de obra de mantenimiento de 6,54 %⁶ y una tasa de interés anual del 6,44 %⁷.

⁵ Banguat, promedio inflación anual del 2010 al 2015.

⁶ Ministerio de Trabajo de Guatemala. *Promedio anual de la tasa de incremento al salario mínimo del 2010 al 2015.*

⁷ Banguat, tasa de interés activa en moneda extranjera, promedio del 2010 al 2015.

Tabla XXIX. **Flujo de ingresos del proyecto (US\$)**

Año	Ahorro por recuperación de azúcar	Venta adicional de energía eléctrica	Ingresos operativos
1	213 546,24	422 651,52	636 197,76
2	213 546,24	422 651,52	636 197,76
3	213 546,24	422 651,52	636 197,76
4	213 546,24	422 651,52	636 197,76
5	213 546,24	422 651,52	636 197,76
6	213 546,24	422 651,52	636 197,76
7	213 546,24	422 651,52	636 197,76
8	213 546,24	422 651,52	636 197,76
9	213 546,24	422 651,52	636 197,76
10	213 546,24	422 651,52	636 197,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Flujo de egresos del proyecto (US\$)**

Año	Consumo energético	Materiales de mantenimiento	Mano de obra de mantenimiento	Egresos operativos
1	103 680,00	7 512,50	4 151,27	115 343,77
2	103 680,00	7 831,03	4 422,76	115 933,79
3	103 680,00	8 163,07	4 712,01	116 555,08
4	103 680,00	8 509,18	5 020,18	117 209,36
5	103 680,00	8 869,97	5 348,50	117 898,47
6	103 680,00	9 246,06	5 698,29	118 624,35

Continuación de la tabla XXX.

7	103 680,00	9 638,09	6 070,96	119 389,05
8	103 680,00	10 046,74	6 468,00	120 194,74
9	103 680,00	10 472,73	6 891,00	121 043,73
10	103 680,00	10 916,77	7 341,68	121 938,45

Fuente: elaboración propia.

A partir de estos datos se calculará la utilidad operativa, los gastos financieros y la utilidad antes de impuestos.

$$Utilidad\ operativa = Ingresos - egresos - depreciación$$

Los gastos financieros son los intereses que se deben de pagar por el dinero prestado.

$$Interés = Saldo\ inicial * Tasa\ de\ interés\ anual$$

$$Utilidad\ antes\ de\ impuestos = Utilidad\ operativa - gastos\ financieros$$

Tabla XXXI. **Estimación de la utilidad antes de impuestos (US\$)**

Año	Utilidad operativa	Gastos financieros	Utilidad antes de impuestos
1	340 948,99	81 101,17	259 847,82
2	340 358,97	72 991,06	267 367,91
3	339 737,68	64 880,94	274 856,74

Continuación de la tabla XXXI.

4	339 083,40	56 770,82	282 312,58
5	338 394,29	48 660,70	289 733,59
6	337 668,42	40 550,59	297 117,83
7	336 903,71	32 440,47	304 463,25
8	336 098,02	24 330,35	311 767,67
9	335 249,03	16 220,23	319 028,80
10	334 354,32	8 11012	326 244,20

Fuente: elaboración propia.

5.2.7.1. Análisis de opciones de inversión

Para el proyecto del nuevo molino se analizarán dos escenarios para realizar la inversión:

- Inversión pagada en un 70 % por crédito bancario, 30 % capital propio
- Inversión pagada en un 100 % por capital propio

Escenario 1: se considera un tiempo de financiamiento de 10 años plazo, un tiempo de depreciación del equipo de 10 años, una tasa de interés anual del 6,44 % y una fracción del 25 %⁸ para pago de impuestos.

El monto de la inversión inicial para el crédito bancario será entonces de \$. 1 259 335,00, y el aporte del capital propio en el año cero será de \$ 539,715.00.

⁸ Superintendencia de Administración Tributaria. *Tarifa para los años 2015 en adelante, régimen sobre las utilidades de rentas de actividades lucrativas*. Art. 18, 36 y 172.

La depreciación a aplicar al equipo será en línea recta, por lo que el monto anual de la misma será de \$. 179 905,00.

La amortización a capital se hará de forma anual, por lo que el monto a pagar será el monto en crédito dividido entre la cantidad de años:

$$\$ \frac{1\,259\,335}{10} = \$ 125\,934 / \text{año}$$

Entonces, la amortización anual al capital al término del periodo de evaluación tendrá una distribución como se muestra a continuación.

Tabla XXXII. **Amortización anual a capital**

Año	Saldo a capital (US \$)
1	1,133 401,50
2	1,007 468,00
3	881 534,50
4	755 601,00
5	629 667,50
6	503 734,00
7	377 800,50
8	251 867,00
9	125 933,50
10	0,00

Fuente: elaboración propia.

El pago de intereses se realizará desde el primer año; el valor del interés en el primer año se calculará de la manera siguiente:

$$\text{Interés año 1} = \text{Saldo inicial} * \% \text{ de interés}$$

A partir del año dos en adelante, se calculará de la siguiente forma:

$$\text{Interés año } n = SC_{n-1} * \% \text{ de interés}$$

Donde:

$$SC_{n-1} = \text{Saldo a capital restante del año anterior}$$

El cálculo de los impuestos en el escenario 1 se realizará de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Impuestos} &= (\text{Utilidad operativa} - \text{gastos financieros}) \\ &\quad * \% \text{ de impuestos} \end{aligned}$$

Tabla XXXIII. **Cálculo de egresos del proyecto, escenario 1 (US\$)**

Año	Egresos						Total
	Préstamo bancario	Capital propio	Egresos operativos	Impuestos	Pago a capital	Pago de intereses	
0	1 259 335,00	539 715,00					1 799 050,00
1			115 343,77	64 961,95	125 933,50	81 101,17	387 340,39
2			115 933,79	66 841,98	125 933,50	72 991,06	381 700,33
3			116 555,08	68 714,19	125 933,50	64 880,94	376 083,71
4			117 209,36	70 578,15	125 933,50	56 770,82	370 491,83
5			117 898,47	72 433,40	125 933,50	48 660,70	364 926,07
6			118 624,34	74 279,46	125 933,50	40 550,59	359 387,89

Continuación de la tabla XXXIII.

7			119 389,05	76 115,81	125 933,50	32 440,47	353 878,83
8			120 194,74	77 941,92	125 933,50	24 330,35	348 400,51
9			121 043,73	79 757,20	125 933,50	16 220,23	342 954,66
10			121 938,44	81 561,05	125 933,50	8 110,12	337 543,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Cálculo de ingresos del proyecto, escenario 1(US\$)**

Año	Ingresos operativos	Préstamo	Total
0			0.00
1	636 197,76	1 259 335,00	1 895 532,76
2	636 197,76		636 197,76
3	636 197,76		636 197,76
4	636 197,76		636 197,76
5	636 197,76		636 197,76
6	636 197,76		636 197,76
7	636 197,76		636 197,76
8	636 197,76		636 197,76
9	636 197,76		636 197,76
10	636 197,76		636 197,76

Fuente: elaboración propia.

Teniendo los ingresos y egresos totales durante el período de depreciación, se calcula el flujo neto de efectivo que se tendrá a lo largo de dicho período. El flujo neto de efectivo se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Flujo neto de efectivo} = \text{Total ingresos} - \text{total egresos}$$

Tabla XXXV. **Cálculo del flujo neto de efectivo del proyecto, escenario 1 (US\$)**

Año	Flujo neto de efectivo
0	-1799 050,00
1	1,508 192,37
2	254 497,43
3	260 114,05
4	265 705,93
5	271 271,69
6	276 809,87
7	282 318,93
8	287 797,25
9	293 243,10
10	298 654,65

Fuente: elaboración propia.

Escenario 2: si el monto total de la inversión es pagado con capital propio, el desembolso inicial será de \$. 1 799 050,00, considerando los factores de tiempo de depreciación, una tasa de interés, una tasa de inflación y un porcentaje de impuestos iguales a los del escenario 1:

En el escenario 2 el cálculo de impuestos toma únicamente el valor de la utilidad operativa puesto que no existen gastos financieros, y su ecuación es la siguiente:

$$\text{Impuestos} = \text{Utilidad operativa} * \% \text{ de impuestos}$$

Tabla XXXVI. **Cálculo de egresos del proyecto, escenario 2 (US\$)**

Año	Capital propio	Egresos operativos	Impuestos	Total egresos
0	1 799 050,00			1 799 050,00
1		115 343,77	85 237,25	200 581,02
2		115 933,79	85 089,74	201 023,53
3		116 555,08	84 934,42	201 489,50
4		117 209,36	84 770,85	201 980,21
5		117 898,47	84 598,57	202 497,04
6		118 624,34	84 417,10	203 041,44
7		119 389,05	84 225,93	203 614,98
8		120 194,74	84 024,50	204 219,24
9		121 043,73	83 812,26	204 855,99
10		121 938,44	83 588,58	205 527,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Cálculo de ingresos del proyecto, escenario 2 (US\$)**

Año	Ingresos operativos	Total ingresos
0		
1	636 197,76	636 197,76
2	636 197,76	636 197,76
3	636 197,76	636 197,76
4	636 197,76	636 197,76
5	636 197,76	636 197,76
6	636 197,76	636 197,76
7	636 197,76	636 197,76

Continuación de la tabla XXXVII.

8	636 197,76	636 197,76
9	636 197,76	636 197,76
10	636 197,76	636 197,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Cálculo del flujo neto de efectivo del proyecto, escenario 2 (US\$)**

Año	Flujo neto de efectivo
0	-1 799 050,00
1	435 616,74
2	435 174,23
3	434 708,26
4	434 217,55
5	433 700,72
6	433 156,32
7	432 582,78
8	431 978,52
9	431 341,77
10	430 670,74

Fuente: elaboración propia.

5.2.7.2. Cálculo del valor actual neto (VAN)

Este método será utilizado para evaluar la valoración de las opciones de inversión.

$$VAN = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

F = flujos de dinero en cada período *n*

*I*₀ = inversión realizada en el año 0

n = cantidad de años

k = tasa de descuento exigido a la inversión

El VAN permite tomar dos tipos de decisiones: la primera es si las inversiones son factibles desde el punto de vista financiero y la segunda, cuál inversión es la mejor en términos absolutos.

Los criterios de decisión son los siguientes:

- VAN > 0: el valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.
- VAN = 0: el proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas, siendo su realización, en un principio indiferente.
- VAN < 0: el proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

Para el cálculo del VAN en los dos escenarios, se utilizará una tasa de descuento (*k*) que se conforma con la integración del costo ponderado de capital, considerando las diferentes fuentes y aplicando una tasa de riesgo estimada en un 2,8 %, de la manera siguiente: capital propio: 30 % con un costo de oportunidad de 2,94 %⁹ (tasa pasiva bancaria en inversiones a plazo). Capital en préstamo: 70 % con un costo de 6,44 % anual (tasa activa bancaria).

⁹ Banguat, tasa de interés pasiva en moneda extranjera, promedio del 2010 al 2015.

$$k = \frac{C_p \times T_p + C_f \times T_a}{C_p + C_f} + Tr$$

Donde:

C_p = capital propio

C_f = capital en préstamo (financiamiento)

T_p = tasa de capital propio

T_f = tasa de capital en préstamo

Tr = tasa estimada de riesgo

Entonces la tasa de descuento (k) que se obtiene es de 16 %.

Por lo que:

VAN escenario 1: \$. 1 163 695,44

VAN escenario 2: \$. 1 086 102,11

5.2.7.3. Cálculo de la tasa interna de retorno (TIR)

Es la tasa de descuento que iguala al momento inicial, la corriente futura de ingresos con la de egresos, generando un VAN igual a cero. Es una medida utilizada en la evaluación de proyectos de inversión como un indicador de rentabilidad que define que a mayor TIR, mayor rentabilidad, la cual se utiliza como un criterio para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para la tasa mínima o tasa de corte se utilizará la tasa de descuento, que como se dijo, se integra del costo ponderado de capital más una tasa estimada de riesgo:

$$TIR = \frac{-I + \sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n n * F_i}$$

El criterio de selección será el siguiente: (“k” es la tasa de descuento de flujos elegida para el cálculo del VAN)

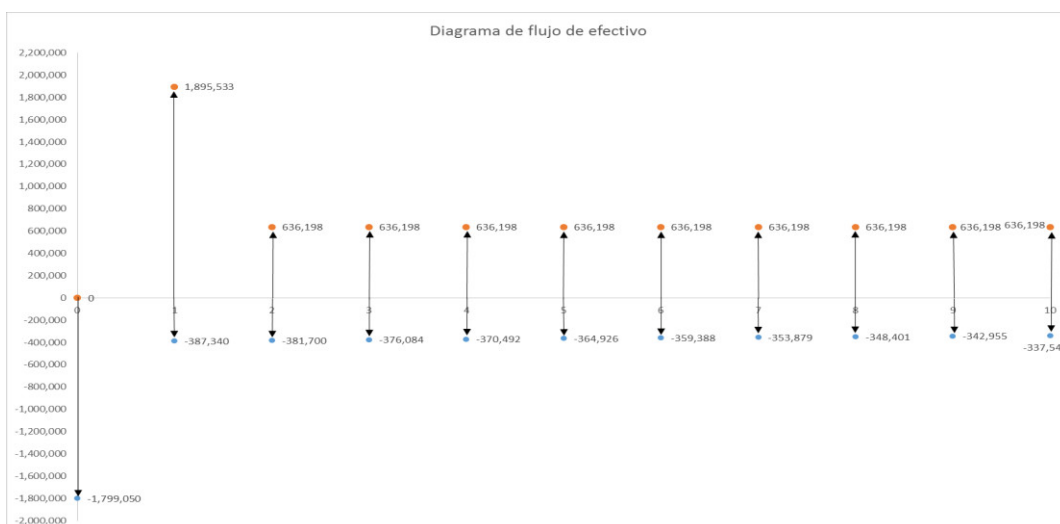
- Si $TIR > k$: el proyecto de inversión será aceptado.
- Si $TIR = k$: la inversión podrá llevarse a cabo si mejora la posición competitiva de la empresa o no hay alternativas.
- Si $TIR < k$: el proyecto debe rechazarse.

TIR escenario 1: 29 %

TIR escenario 2: 20 %

Como se indicó, para el proyecto se estableció una tasa de rendimiento mínimo aceptable del 8,19 %, por lo que el proyecto resulta ser rentable en ambos escenarios, pero por el valor de la TIR más elevado en el escenario 1, es evidente que lo más favorable es la compra utilizando un financiamiento bancario.

Figura 38. Diagrama de flujo de efectivo opción 1



Fuente: elaboración propia.

5.2.7.4. Cálculo del retorno de la inversión

El índice de retorno sobre la inversión (ROI por sus siglas en inglés) es una razón financiera para comparar el beneficio obtenido en relación con la inversión realizada, mide la rentabilidad de una inversión:

$$ROI = \frac{(Renta\ neta - inversión)}{Inversión}$$

Donde:

$$Renta\ neta = Total\ ingresos - total\ egresos$$

A partir de la renta neta obtenida a lo largo de la proyección de ingresos y egresos, al finalizar la vida útil del molino se tiene que el valor de esta renta es de \$ 2 739 270,27.

$$ROI = \frac{(2\ 739\ 270,27 - 1\ 799\ 050)}{1\ 799\ 050}$$

$$ROI = 0,5226$$

Esto quiere decir que, al finalizar el tiempo de depreciación del molino se habrá obtenido una rentabilidad del 52,26 % sobre la inversión inicial.

5.2.7.5. Tiempo de retorno de la inversión

Es un indicador que mide tanto la liquidez del proyecto como el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial. A continuación, se describe su forma de cálculo:

- Se calcula la sumatoria de los flujos netos de efectivo en dos periodos, uno donde se excede el monto de la inversión y uno previo al mismo.
- De esto se tiene que los valores se encuentran entre los periodos 8 (FNE= \$. 1 607 657,52) y 9 (FNE= \$. 1 900 900,62).
- Se calcula el costo no recuperado al principio del año 8, es decir, la inversión inicial menos el FNE del año 8:

$$\$ 1\,799\,050 - \$ 1\,607\,657,52 = \$ 191\,392,48$$

- Se divide el costo no recuperado entre el FNE del año 9:

$$\frac{\$ 191\,392,48}{\$ 1\,900\,900,62} = 0,1006$$

El tiempo de retorno de la inversión será de 8,1006 años u 8 años y un mes.

5.2.7.6. Cálculo del beneficio-costo

Con este análisis se comparan de forma directa los beneficios y los costos, para lo que se utiliza el valor actual de la suma de los beneficios descontados y se divide dentro de la suma de los costos descontados.

- $B/C > 1$: los beneficios superan los costos, por consiguiente, el proyecto debe ser considerado.
- $B/C = 1$: no hay ganancias, los beneficios son iguales a los costos.
- $B/C < 1$: muestra que los costos son mayores que los beneficios, por lo que no se debe considerar.

$$B/C = \frac{6\,361\,977,60}{3\,622\,707,33}$$

$$B/C = 1,76$$

5.3. Infraestructura y montaje

La instalación del nuevo molino 6 de 45"x90" se hará durante la época de reparación en la planta. Las actividades se describen a continuación:

Tabla XXXIX. Actividades de montaje y estimación de tiempos del proyecto

Actividad	Duración
PROYECTO MOLINO NUEVO	203 días
DETALLES PRELIMINARES	35 días
Diseño de planos	20 días
Solicitud de materiales	10 días
Realizar contrato para mano de obra	5 días
DESMONTAJE	8 días
Desmontar molino	2 días
Desmontar transmisiones de baja	2 días
Desmontar transmisiones de media	2 días
Desmontar transmisiones de alta	2 días
ESTRUCTURA DEL MOLINO	82 días
Trazo de medidas	3 días
Demolición de estructura actual	20 días
Excavación para cimiento (4"x1"x10")	20 días
Fabricar armadura	5 días
Montar armadura	5 días
Fabricar formaleta	5 días
Fundición de cimiento del molino	2 días
Fundición de muro del molino	1 día
Fundición para soporte de bandeja	1 día
Fraguado y curado del concreto	20 días
ESTRUCTURA DEL MOTOR Y TRANSMISION SUPERIOR	11 días
Fundición del soporte del motor y del reductor	1 día
Fraguado y curado del concreto	10 días
MONTAJE DEL MOLINO NUEVO	36.45 días
Montaje de pernos de anclaje	1 día
Montaje del motor maza superior	0.33 días
Montaje del reductor planetario maza superior	0.56 días
Alineación del motor eléctrico maza superior	2 días
Instalación de pernos de anclaje para vírgenes	1 día
Instalación de platinas de las vírgenes	1 día
Montaje de vírgenes	0.56 días
Alineación de vírgenes	3 días
Instalación de bandeja de jugo	1 día
Montaje de cuchilla central	1 día
Montaje de maza cañera	2 días
Montaje de maza bagacera	2 días
Montaje de cuchilla cuarta maza	1 día
Montaje de cuarta maza	1 día
Instalación de guarda jugos inferiores	2 días
Montaje de maza superior	1 día
Instalación de guarda jugos superiores	1 día
Instalación de cabezotes hidráulicos	0.5 días
Montaje de peine superior	0.5 días
Instalación del acople flexible	2 días
Montaje del reductor planetario maza cañera	2 días
Instalación del motor eléctrico maza cañera	1 día
Montaje del reductor planetario maza bagacera	2 días
Instalación del motor eléctrico maza bagacera	1 día
Instalación del sistema de lubricación de las chumaceras	3 días
Instalación del sistema de agua de enfriamiento para las chumaceras	2 días
Instalación de los acumuladores de presión hidráulica para los cabezotes	1 día

Fuente: elaboración propia.

5.3.1. Guía para el montaje

A continuación, se describen las actividades que se realizarán para el montaje del molino nuevo de 45"x90":

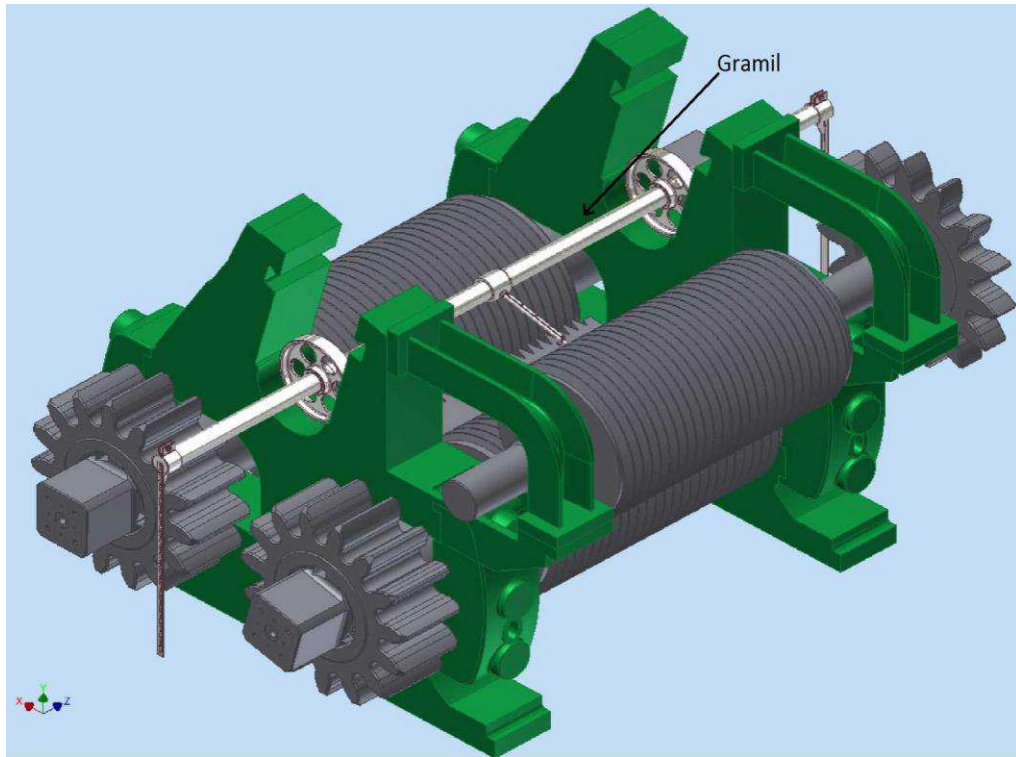
- Colocación de pernos de anclaje para reductor planetario de la maza superior:
 - Se deben de fijar los pernos a la base que sostendrá el reductor planetario.
 - Los pernos de anclaje serán de acero al carbón, de alta resistencia de 2" de diámetro por 50" de largo con 15" de rosca ordinaria en cada extremo.
- Montaje del motor eléctrico de 1 250 hp para la maza superior:
 - Con el uso del puente grúa, se colocará el motor eléctrico en el bancazo destinado para el mismo, que será fijado con cuatro tornillos de 1 1/4" de grosor por 7" de largo, grado 8 y rosca ordinaria de 5".
- Montaje de reductor planetario para la maza superior:
 - Con el uso del puente grúa se colocará el reductor planetario con una potencia instalada de 600 kW en el bancazo diseñado para el mismo.
 - Se instalará un sistema de lubricación forzado para los engranajes del reductor que consiste en un conjunto de dos bombas independientes, contando cada una con un motor de 1 hp y un enfriador de aceite de circulación con sus respectivos filtros. Cada bomba tendrá una capacidad de presión de 5 psi y trabajará en

ciclos programados una a la vez (una disponible y la otra en espera).

- Alinear el motor eléctrico respecto del reductor planetario de la maza superior:
 - El motor eléctrico y el reductor planetario deben ser acoplados, garantizando previamente la correcta alineación de las mazas de su acoplamiento. Para lo que se usará el método de alineación láser o indicadores de carátula; luego de verificar la alineación se procederá al acoplamiento.
- Instalación de pernos para anclaje de vírgenes del molino:
 - Se barrenarán los agujeros en la base del molino y se procederá a realizar la instalación de 6 pernos de 3 ½" de grosor por 91" de largo, que sujetarán a las vírgenes.
- Colocación de platinas para vírgenes del molino:
 - La función de las platinas es nivelar las vírgenes de modo que ambas estén a la misma elevación, lo que se logra a partir de la utilización de una herramienta patrón y una escuadra. Para su fijación a la base se utilizará un cemento especial conocido como *grouting*.
- Montaje de las vírgenes del molino:
 - Las vírgenes serán montadas una a la vez utilizando el puente grúa; se colocarán cuidadosamente sobre las platinas y se ajustarán mediante los pernos de anclaje.
- Nivelar las vírgenes del molino y alinear con respecto al reductor planetario de la maza superior:

- La nivelación entre las vírgenes de un molino se realizará mediante el empleo de una herramienta llamada gramil (ver figura 42), que se colocará en el lugar donde se ubicará la maza superior, simulando ser la línea central del eje de la misma. Utilizando un instrumento de medición basado en el principio de los vasos comunicantes en forma de “U”, con agua como líquido de trabajo, se comprobará que la altura en los niveles de agua medidos al centro simulado de la maza superior sean los mismos. Si la altura del agua es la misma, en ambos extremos se tendrán alineados los molinos, de no ser así se procederá a colocar calzos debajo de los bancazos de las vírgenes hasta lograr dicha paridad en los niveles mencionados.
- Para alinear el reductor planetario es necesario considerar la flotación de la maza superior, ya que cuando esta está en operación tiende a subir su nivel. Se tomará el valor definido para dicha flotación; se trazará una línea guía marcada por un láser de precisión, que será proyectado desde el centro del eje de la maza superior hasta donde se ubicará el reductor planetario. A partir de esta línea guía se medirá la distancia debajo del valor de la flotación y será a esta altura a la que se instalará el reductor planetario principal.

Figura 39. Colocación del gramil en las vírgenes del molino



Fuente: DELFINI, Paulo. *Curso Cengicaña para avanzado de extracción y eficiencia de molinos azucareros*, 2014.

- Instalación de bandeja de jugo o recibidor de maceración:
 - El canal debe ir soldado a las vírgenes con soldadura inoxidable 54L, con el fin de evitar filtraciones de jugo al cárcamo.
 - La bandeja de jugo será de lámina de acero inoxidable de 6 mm de espesor y se atornillará a los cabezales con pernos de acero inoxidable y arandelas de cobre. Las uniones deben sellarse adecuadamente para evitar cualquier fuga de jugo.

- Armar y montar la cuchilla central del molino:
 - Se montará el conjunto de puente y cuchilla central, ajustándose los espárragos de la cuchilla central hasta la configuración requerida. Posteriormente se instalarán las chumaceras del puente.
 - La cuchilla central será de acero fundido, fijada con tornillos de alta resistencia y tuercas con medios de ajuste en dirección horizontal y vertical desde afuera del cabezal.

- Armado y montaje de la maza cañera, dándole el ajuste “*setting*” requerido según las necesidades de molienda de caña de la zafra a comenzar:
 - De acuerdo con el “*setting*”, se dará el ajuste en una posición relativa respecto de la cuchilla central, la cuarta maza y la maza superior. El procedimiento consiste en dejar cierta distancia de la maza cañera a la cuchilla central y la cuarta maza, con el fin de proporcionar las condiciones de compactación y extracción necesarias del guarapo.
 - El “*setting*” de la maza cañera se determina al medir las distancias entre virgen y virgen, así como el espacio entre la virgen y la bisagra. Según los parámetros establecidos por el Departamento de Molinos y de acuerdo con el diámetro del eje maza y la configuración definida, se establecerá si cumple con las medidas requeridas; de no ser así (debido al desgaste que presentará con cada zafra) se deberá de ajustar con calzos.
 - Se colocará el gramil sobre la teja inferior de la maza superior, simulando ser la maza superior y se medirá la longitud de la varilla hasta la raíz de la maza cañera, luego del diente de la maza cañera hasta la raíz de la maza superior.
 - Las cajas donde serán instaladas las chumaceras de bronce de la maza cañera deberán de ser de carcasa de hierro fundido con

- revestimiento de metal, y tendrán un arreglo de agua de enfriamiento, con anillos sellantes para evitar filtración del jugo.
 - La maza cañera deberá de ser del tipo Lotus con agujeros transversales y longitudinales para permitir un efectivo drenado del jugo.
 - El diámetro exterior de la maza cañera deberá de ser de 45”.
 - La maza cañera se instalará con sellos de anillos y guardas para prevenir la entrada de jugo a las chumaceras.
- Armado y montaje de la maza bagacera, dándole el “*setting*” requerido para la molienda de caña de la zafra a comenzar:
 - Se medirá el espacio entre la virgen y la bisagra, de acuerdo con el diámetro del eje de la maza y la configuración definida según parámetros establecidos por el Departamento de Molinos; se comparará si cumple con las medidas requeridas; de no ser así (debido al desgaste que presentará con cada zafra) se deberá de ajustar con calzos. También se medirá la distancia entre la virgen y la maza superior.
 - Utilizando el gramil de manera similar al procedimiento anterior, se medirá la longitud de la varilla hasta la raíz de la maza bagacera, luego del diente de la maza bagacera hasta la raíz de la maza superior.
 - Las cajas donde se instalarán las chumaceras de bronce de la maza bagacera deberán de ser de carcasa de hierro fundido con revestimiento de metal, y tendrán un arreglo de agua de enfriamiento, con anillos sellantes para evitar filtración del jugo.
 - Tanto la maza cañera como la bagacera estarán acopladas directamente con la salida del eje del reductor planetario mediante un anillo de contracción.
 - La maza bagacera será del tipo convencional.

- El diámetro exterior de la maza bagacera deberá de ser de 46".
- La maza bagacera se instalará con sellos de anillos y guardas para prevenir la entrada de jugo a las chumaceras.
- Armado y montaje de la cuchilla cuarta maza:
 - La cuchilla cuarta maza será barrenada con agujeros y armada con su respectivo eje se fijarán con 9 tornillos de 7/8" por 8" de largo grado 8; posteriormente será montado el conjunto en el molino.
- Armado y montaje de la cuarta maza
 - Se instalarán dos chumaceras de bronce del tipo cilíndrico en cada extremo del eje de la cuarta maza, que serán de 12" de diámetro interno y largo de 14" (lado espiga o libre). A la cuarta maza se le instalará una corona de diámetro externo de 35" y 12" de diámetro interno y 20 dientes rectos.
- Montaje de los guardajugos inferiores, entre las mazas cañera y bagacera: los guardajugos se instalarán en los laterales de las mazas, uno del lado libre y el otro del lado corona, soportados en las vírgenes del molino; su propósito es evitar que el bagazo o jugo extraído se filtre en las chumaceras y en la cuchilla central; de esta manera se formará un espacio rectangular por donde pasará el bagazo.
- Montaje de la maza superior con la corona lado espiga:
 - El conjunto de la maza con la corona se colocará sobre las chumaceras inferiores. Luego de asegurar el asentamiento del mismo, se instalarán las chumaceras superiores. En este procedimiento ya no se realizará el ajuste de "*setting*", puesto que

es a partir de la maza superior que se calcula el “*setting*” de las demás mazas.

- El eje de la maza superior deberá instalarse adecuadamente para después efectuar un acople especial de eslingas.
 - La maza superior será del tipo Lotus con agujeros transversales y longitudinales, para permitir un efectivo drenado del jugo.
 - El diámetro exterior de la maza superior será de 45”.
 - Un collar estático se instalará en la maza superior para evitar filtraciones de jugo en las chumaceras.
- Montaje de guardajugos fijos superiores entre maza superior y cuarta maza: los guardajugos se instalarán en los laterales de las mazas, uno del lado libre y el otro del lado corona, soportados en las vírgenes del molino, colocados entre la maza superior y la cuarta maza. Su propósito es evitar que el bagazo o jugo extraído se filtre en las chumaceras de la maza superior y las de la cuarta maza. Entre los guardajugos inferiores y los superiores se formará un espacio rectangular por donde fluirá el bagazo.
 - Montaje de las chumaceras de la maza superior, lado espiga y lado transmisión:
 - La excentricidad entre el centro de la chumacera de la maza superior y el centro del cabezote hidráulico será como mínimo de 40 mm hacia el lado de la alimentación.
 - Las chumaceras de la maza superior deberán ser de carcasa de hierro fundido con revestimiento de metal, con un arreglo de agua de enfriamiento; la mitad de abajo deberá tener un forro de bronce con canales de lubricación.

- Montaje de los cabezotes hidráulicos sobre las chumaceras de la maza superior, lado espiga y lado transmisión.
 - El sistema hidráulico debe ser configurado para una presión de aceite de 280 kg/cm².
 - Para la unidad de bombeo hacia el acumulador, así como del acumulador a la capa superior, se instalará una tubería de acero al carbono sin costura apto para 450 kg/cm².

- Montaje del peine bagacero:
 - Se instalará un eje cuadrado de 4" de grosor por 90" de largo, que llevará 11 agujeros para tornillos de 7/8". Estará soportado a dos chumaceras en cada extremo del eje, las cuales a su vez irán atornilladas y soldadas en los laterales de las vírgenes.
 - Se montará el peine que limpiará la maza bagacera. Sus dimensiones serán de 90" de largo y de 16" de ancho, con rayado de 2" entre sus dientes y ángulo de 45°. Estará sujeto a una lámina de 1" de grosor por 15" de ancho; en un extremo tendrá 9 agujeros para tornillos de 7/8". Mediante estos tornillos se sujetará el peine a la lámina; en el otro extremo tendrá 11 agujeros para tornillos de 7/8" que sujetarán la lámina al eje.
 - El peine bagacero será instalado sobre la maza bagacera y trabajará 1" delante el centro de la misma. En la abertura formada entre el peine y la maza bagacera saldrá el bagazo hacia las calderas.

- Montaje del acoplamiento flexible de eslabones múltiples y eslingas entre el eje del reductor planetario con el cuadrado del eje de la maza superior:

- Se fijará el primer yugo sobre el eje del reductor planetario, con 10 tornillos de $\frac{3}{4}$ " de grosor por 3 $\frac{1}{2}$ " de largo. Los tornillos serán de cabeza hexagonal y rosca ordinaria de grado 8.
- El segundo yugo se fijará sobre el eje de la maza superior de manera similar al primero.
- El miembro intermedio flotante será conectado a los yugos a través de cables de acero y eslingas de poliéster.
- Montaje del reductor planetario de maza cañera con el motor eléctrico:
 - El reductor planetario de tipo camisa o eje hueco será montado en el bancazo diseñado para el mismo. El eje de la maza deberá tener 12 000 mm de diámetro por 304,8 de largo para conectarse con el reductor.
 - El reductor estará fijado a la base de concreto por medio de un brazo unilateral de torque.
 - Los tornillos de sujeción que fijarán el reductor al eje de la maza estarán apretados con 450 psi de torque.
 - Se instalará el motor eléctrico mediante el puente grúa.
 - El lubricante a utilizar será el Omala 220 sintético.
- Montaje del reductor planetario para la maza bagacera con el motor eléctrico:

El reductor planetario de tipo camisa o eje hueco será montado en el bancazo diseñado para el mismo. El eje de la maza deberá tener 12 000 mm de diámetro por 304,8 de largo para conectarse con el reductor. El reductor estará fijado a la base de concreto por medio de un brazo unilateral de torque.

 - Se instalará el motor eléctrico mediante el puente grúa.

- Los tornillos de sujeción que fijarán el reductor al eje de la maza estarán apretados con 450 psi de torque.
- El lubricante a utilizar será el Omala 220 sintético.
- Instalación de la red de lubricación para las chumaceras de las mazas del molino:
 - El sistema central de lubricación para las chumaceras del molino será independiente del sistema de lubricación del resto de molinos.
 - Con dos unidades de bombeo disponibles, trabajarán alternadamente (una trabajando y otra en espera), conectados a dos puntos de lubricación para cada chumacera, a lo largo de una tubería de acero al carbono sin soldadura,
- Instalación de agua de enfriamiento para todas las chumaceras del molino
 - Se instalará una tubería de 2" de diámetro cédula 40 al pie de la virgen del molino, tanto del lado espiga como del lado corona, en donde se instalarán cuatro válvulas de bronce tipo compuerta con capacidad de 125 psi, con sus respectivos niples galvanizados de 1/2" por 4" de largo.
 - Cada chumacera de la maza tendrá conectada una manguera plástica de 3/4" de diámetro con el largo necesario para cada chumacera.
- Montaje de acumuladores para la presión hidráulica de los cabezotes del molino: en la salida del acumulador se instalará una manguera de 1" de diámetro con capacidad para 5 000 psi, en uno de los extremos de la manguera se pondrá un conector rápido con capacidad de 5 000 psi, conectado al cabezote por medio de un pistón que ejerce la fuerza hacia la maza superior.

CONCLUSIONES

1. A través de un análisis FODA se determinó la conveniencia de cambiar el actual molino No. 6 del tándem A por uno de mayor capacidad, lo que redundará en el incremento de la eficiencia de extracción del jugo de caña y por consiguiente permitirá producir más azúcar y disminución en el consumo energético, lo que se traduce en ahorros de los costos energéticos y la posibilidad de producir y vender más energía eléctrica debido a la mejora calórica del bagazo que es quemado en las calderas como consecuencia de tener una menor humedad.
2. Se evaluaron dos escenarios para la ejecución del proyecto de inversión de la sustitución del molino No. 6 del tándem A. El escenario número 1 considera una inversión con un 30 % de capital propio y 70 % de financiamiento bancario, y el escenario 2 considera una inversión 100 % de capital propio. Luego de analizar los índices financieros obtenidos para cada uno de ellos, se determinó que el escenario número 1 es el mejor para llevar a cabo el proyecto de sustitución del molino número 6.
3. Los índices financieros relevantes son: el VAN de \$ 1 086 102,11; la TIR de 29 %; el ROI de 52,26 %. Además, la relación beneficio/costo es de 1,76, lo que significa que por cada dólar invertido se obtendrá una ganancia neta de \$0,76. Estos valores determinan que la adquisición de un nuevo molino a través de la combinación de 30 % de capital propio y 70 % de financiamiento bancario es factible para mejorar las condiciones de productividad del tándem A del Ingenio Santa Ana.

4. Se determinó que las pérdidas promedio que se tuvieron en las últimas cinco zafras en los puntos críticos de control en la operación de molienda, fueron de alrededor de 15 541 336,31 libras de azúcar remanente en el bagazo y cerca de 1 201,01 libras de azúcar perdidas por mantener una hora de puenteo en el molino.
5. Las ventas adicionales de azúcar que se podrían alcanzar al mejorar la eficiencia del proceso de molienda del molino número 6 del tándem A se estiman en \$. 213 546,24 por zafra.
6. Se estimó que las ventas adicionales de energía eléctrica que se podrían obtener con el cambio del molino número 6 del tándem A podrían llegar hasta el nivel de \$. 422 651,52.
7. Se elaboró una guía para determinar las actividades que se deben desarrollar en el montaje del nuevo molino número 6 del tándem A, en la que se incluyen los requerimientos de la instalación de los distintos equipos que conforman el molino.

RECOMENDACIONES

A la Gerencia de la División Industrial:

1. Hacer el cambio en el tándem A del actual molino número 6 de 40"x78" por uno de 45"x90", que tiene mayor capacidad; con lo cual se podrá obtener una mejor extracción de jugo, reducción de costos y disminución de tiempos perdidos.
2. Realizar la inversión de compra del nuevo molino mediante el uso de un crédito bancario del 70 % del valor total del molino, efectuando un pago con capital propio del 30 % restante.
3. Fortalecer la integración de equipos multidisciplinarios que integren a personal de mantenimiento, a los jefes de departamentos, a los supervisores de maquinaria, a personal operativo, supervisores de operación y a personal del Área Financiera para que aporten ideas sobre la creación de proyectos de inversión y que exista una comisión que se encargue de realizar los análisis respectivos de acuerdo con las necesidades del Ingenio.

A la Jefatura del Departamento de Molinos:

4. Desarrollar un programa de mantenimiento y control de la operación del nuevo molino número 6 del tándem A, para garantizar la mejora en la eficiencia de la extracción de azúcar, así como la disminución de

humedad del bagazo para el incremento de la cogeneración, condiciones que permitan obtener los beneficios económicos de la sustitución.

5. Fortalecer los sistemas de capacitación a nivel técnico, que coadyuven al monitoreo de los resultados de producción en todos los molinos del tándem, tales como los parámetros de pol y humedad en bagazo, que permitan mejorar paulatinamente la productividad general y plantear proyectos para la mejora continua.
6. Realizar evaluaciones durante la zafra sobre el rendimiento del nuevo equipo de molienda, y con ello tener las bases sustentables para considerar la futura modernización del último molino del tándem B.

A la Supervisión de Maquinaria:

7. Supervisar minuciosamente el proceso de instalación y montaje del nuevo molino, especialmente en lo que respecta a la obra civil, puesto que es imprescindible que los cimientos del molino sean adecuados para evitar exceso de vibraciones que puedan dañar elementos mecánicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARADO AYALA, Derik Estuardo. *Diseño de un sistema de mantenimiento preventivo por medio de órdenes de trabajo en el área de centrífugas y estudio económico, en el Ingenio Santa Ana ubicado en la finca Cerritos, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2011. 117 p.
2. CANO MARROQUÍN, César Augusto. *Aplicación de transmisiones hidrostáticas en molinos cañeros*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2003. 165 p.
3. *El proceso de fabricación de azúcar*. [en línea]. <http://imsa.com.gt/sitio/proceso_azucar.pdf> [Consulta: 22 de marzo de 2015].
4. ESQUITE LAINFIESTA, Bryan Ronaldo. *Cuantificación de pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2011. 113 p.
5. ESTRADA MARROQUÍN, Luis Manuel. *Mejoramiento del consumo de lubricantes por tonelada de caña molida de los sistemas de lubricación de chumaceras en los molinos de los tandems A, B y plan de contingencia del Ingenio Santa Ana*. Trabajo de graduación de Ing.

Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2010. 156 p.

6. GARCÍA RAMÍREZ, Jecer Jehu. *Guía del montaje y mantenimiento de los molinos tándem C, Ingenio Magdalena, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2009. 64 p.
7. HUGOT. Emile. *Manual para ingenieros azucareros.* Traducido por Carlos Ruiz Coutiño. México: Cía. Editorial Continental. 803 p.
8. MCKAY RIVERA, Carlos Humberto. *Diseño de la cuarta maza para molinos en el proceso de fabricación de azúcar del ingenio El Baúl.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2006. 185 p.
9. MEJÍA CORREA, Felipe. *Elaboración de un manual técnico ilustrado para el cambio de un molino Fletcher de 28"x48" en el Ingenio San Carlos, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, 2008. 129 p.
10. MENDOZA, Marino. *Documentación de charla sobre el proceso de molienda.* Guatemala: CENGICAÑA, 2008.
11. MONZÓN, Oscar B. *Ruta del azúcar en el área industrial.* Guatemala: ATAGUA, 2011. 105 p.
12. MORALES CUÉLLAR, Erick Alberto. *Selección y aplicación de equipos hidráulicos en el proceso de producción de azúcar en Ingenio La*

Unión, S. A. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2003. 125 p.

13. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín, 2012. 879 p. ISBN 978-3-87040-142-9.
14. REYES, Welmer Flavio. *Patio de caña y calderas*. Diplomado en ingeniería azucarera. Guatemala: CENGICAÑA, 2008. 118 p.
15. RODRÍGUEZ OSORIO, Sergio Estuardo. *Aplicación de sistemas electrónicos en el movimiento de molinos de caña utilizando motores hidráulicos y eléctricos AC*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónica, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería. 2005. 145 p.
16. SERWAY-JEWETT. *Física para ciencias e ingeniería*. 7a ed. USA: Cengage Learning. 2008. 629 p. ISBN-13: 978-607-481-357-9
17. TARQUÍN, Anthony. *Ingeniería económica*. 6a ed. México: Ingramex, 2006. 772 p. ISBN 970-10-5608-6.

ANEXOS

Anexo 1. Molino No. 6 del tándem A instalado



Fuente: instalaciones de Ingenio Santa Ana.

