

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**APLICACIÓN DE TRANSMISIONES HIDROSTÁTICAS EN  
MOLINOS CAÑEROS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**CÉSAR AUGUSTO CANO MARROQUÍN**

ASESORADO POR: ING. CARLOS RENÉ CIFUENTES VILLATORO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2003

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

## FACULTAD DE INGENIERÍA



### *NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA*

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

<b>DECANO</b>	<b>Ing. César Augusto Fernández Fernández</b>
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Mansilla Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jorge Chilo Síguere Rockstroh
EXAMINADOR	Ing. Ivo Lavarreda Pantoja
SECRETARIO	Ing. Manuel de Jesús Castellanos Dubón



***HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR***

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

**APLICACIÓN DE TRANSMISIONES HIDROSTÁTICAS EN  
MOLINOS CAÑEROS**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Carrera de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 25 de septiembre del 2000.

CÉSAR AUGUSTO CANO MARROQUÍN

## **ACTO QUE DEDICO**

### **A DIOS**

Fuente de toda sabiduría

### **A MIS PADRES**

María Lidia Marroquín de Cano  
Jorge Heberto Cano Castro

### **A MI ESPOSA**

Luz María Roca de Cano

### **A MIS HIJAS**

Cecilia Cristina  
María Margarita  
Carmen Lucía

### **A MIS HERMANOS**

Lidia Esperanza  
Jorge Orlando  
Carlos Humberto  
Luis Eduardo

### **A MIS SUEGROS**

Jorge Daniel Roca  
Lilia Esperanza Figueroa de Roca

### **A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO EN INGENIO LA UNIÓN**

#### **AL INGENIERO**

Carlos René Cifuentes V.  
**Por su ayuda y amistad**

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
GLOSARIO	X
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII

## 1. TRANSMISIONES DE POTENCIA TRADICIONALES EN UN MOLINO CAÑERO

1.1	Componentes principales de un molino cañero	1
1.1.1	Vírgenes	1
1.1.2	Mazas y sus ejes	7
1.1.3	Cuchilla central y peines	15
1.1.4	Accesorios	19
1.2	Turbinas de vapor	26
1.2.1	Tipos de turbinas utilizadas	26
1.2.2	Condiciones actuales de operación	28
1.3	Reductores de velocidad	30
1.3.1	Tipos de reductores utilizados	30
1.3.2	Rangos de operación	33
1.3.3	Acoplamiento de los reductores de baja velocidad al molino	33

## **2. TRANSMISIONES DE POTENCIA HIDROSTÁTICAS**

2.1	Componentes básicos de una transmisión hidrostática	37
2.1.1	Unidad de potencia	37
2.1.2	Motor hidráulico	45
2.1.3	Accesorios	53
2.2	Principios básicos de operación	57
2.2.1	Presión, velocidad y flujo	59
2.2.2	Características de los sistemas estándar y los sistemas de alto torque y baja velocidad	67

## **3. EMPLEO DE UNA TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA EN UN MOLINO CAÑERO**

3.1	Antecedentes	71
3.2	Propuesta para aplicar la transmisión hidrostática en una una maza de un molino cañero	78
3.3	Actividades a realizar previamente	84
3.3.1	Modificación de los ejes de las mazas	85
3.3.1.1	Cambio de diseño de un extremo de los ejes	85
3.3.2	Definición del espacio físico necesario	92
3.3.2.1	Localización de la unidad de potencia	92
3.3.2.2	Posición del brazo de torsión	92
3.3.3	Disponibilidad de energía eléctrica	95
3.3.3.1	Demanda de la unidad de potencia	95

3.3.3.2	Transformador de potencia	96
3.3.3.3	Tableros y protecciones eléctricas	97
3.3.4	Equipos necesarios para automatización	98
3.3.4.1	Controlador lógico programable (PLC)	98
3.3.4.2	Sensores de velocidad angular del reductor y el motor hidráulico	99
3.3.4.3	Interfase de operación	99
3.3.4.4	Sistema ininterrumpido de potencia (UPS)	100
3.4	Ventajas esperadas de la aplicación	101
3.4.1	Ahorro de energía térmica	101
3.4.2	Potencia adicional	102
3.4.3	Aumento de la extracción de azúcar	103

#### **4. OPERACIÓN DE LA TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA EN MOLINOS CAÑEROS**

4.1	Sistema de protección y mando local	105
4.1.1	Diagrama de bloques	106
4.1.2	Funcionamiento general	107
4.1.3	Parametrización y configuración	109
4.1.4	Mando de velocidad	109
4.1.5	Señalización, alarmas y disparos de protección a la unidad de potencia	111
4.1.5.1	Sensores de protección	111
4.1.5.2	Sensores de regulación	112
4.1.5.3	Confirmaciones y enclavamientos	113

4.2	Sistema de mando remoto	115
4.2.1	Estructura básica	115
4.2.2	Funcionamiento general	116
4.2.3	Mando en condiciones de seguimiento de velocidad o presión	117
4.2.4	Interfase del mando remoto con el operador	118
4.2.5	Enlazamientos y alarmas colectivas	120

## **5. CONTROLES PARA OPTIMIZAR SU FUNCIONAMIENTO**

5.1	Establecimiento de los rangos de las variables	124
5.1.1	Velocidad	125
5.1.2	Presión	125
5.1.3	Temperatura	126
5.1.4	Agua de enfriamiento	126
5.1.5	Fluido	126
5.2	Monitoreo de una característica de calidad	127
5.2.1	Definición de la característica	127
5.2.2	Variaciones de velocidad en la transmisión Hidrostática buscando mejorar la característica de calidad	128
5.2.3	Importancia económica de mejorar la característica	133
5.3	Definición de otras características de calidad por su importancia económica	134
5.3.1	Humedad en el bagazo de caña	135
5.3.2	Agua de imbibición	137

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Vírgenes y sus bancazos	2
2	Tipos de vírgenes	3
3	Molino de 6 mazas	4
4	Molino de 3 mazas	6
5	Molinos de 4 mazas	6
6	Detalle de dientes y rayado de mazas superior e inferior	9
7	Ranuras mesher	10
8	Chevrones	11
9	Maza lotus	12
10	Diseño de ejes de mazas	14
11	Posición de la cuchilla central en las mazas	15
12	Cuchilla central y puente	16
13	Posición de los peines en las mazas	18
14	Cabezote hidráulico y acumulador	20
15	Tapaderas laterales o monos	21
16	Coronas	22
17	Chumaceras inferiores y superiores	24
18	Turbina de vapor tipo impulsión	27
19	Tamaño de una catarina y piñón	32
20	Posición de la barra de acoplamiento y acoples	35
21	Bomba de paletas	39
22	Bomba de pistones	40
23	Tanque de aceite	42

24	Intercambiador de calor	45
25	Motores hidráulicos de paletas, engranes y pistones	46
26	Motor hidráulico de pistones axiales	50
27	Motor hidráulico de bloque de cilindros radiales	51
28	Motor hidráulico de anillos de levas	52
29	Tipos de manómetros	56
30	Circuitos hidráulicos abierto y cerrado	58
31	Transmisión tradicional e hidrostática en maza inferior	75
32	Diseño de ejes inferiores	85
33	Posición de coronas superior y cuarta maza	86
34	Posición actual de las coronas superior y cuarta maza	87
35	Espiga requerida para el motor hidráulico	88
36	Dimensiones de espiga	88
37	Radio de un segmento circular	89
38	Localización de los puntos de similitud de la espiga	90
39	Diseño final de la espiga y el eje	91
40	Brazo de torsión y su posición en el molino	93
41	Componentes de la transmisión hidrostática	105
42	Diagrama de bloques simplificado del controlador	107
43	Encoder	110
44	Diagrama de bloques del sistema de control de un molino cañero	116
45	Curva de control de presión	118
46	Pantalla de interfase remota con el operador	119



## TABLAS

I	Tamaños más comunes de molinos cañeros	5
II	Condiciones actuales de operación	29
III	Rangos de operación de reductores	33
IV	Rangos de operación de motores hidráulicos	69

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>ASME</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, <i>American Society of Mechanical Engineering</i> .
<b>ASTM</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana de ensayos de Materiales, <i>American Society for Testing of Materials</i> .
<b>ISO</b>	Siglas en inglés de la Organización Internacional de Normas, <i>International Standards Organization</i> .
<b>NFPA</b>	Siglas en inglés de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego, <i>National Fire Protection Association</i> .
<b>SAE</b>	Siglas en inglés de la Sociedad de Ingenieros Automotrices, <i>Society of Automotive Engineers</i> .
<b>ICUMSA</b>	Siglas en inglés de la Comisión Internacional de Uniformidad de Métodos para Análisis de Azúcar, <i>International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis</i> .
<b>°C</b>	Símbolo de temperatura en grados Celsius.
<b>°F</b>	Símbolo de temperatura en grados Fahrenheit.

<b>rpm</b>	Dimensional de velocidad, en revoluciones por minuto.
<b>gpm</b>	Dimensional de flujo, en galones por minuto.
<b>hp</b>	Dimensional de potencia, <i>horse power</i> en inglés y caballos de potencia en español
<b>Ton.</b>	Abreviatura de tonelada corta, 1 Ton. = 2000 libras
<b>Lb. – pié</b>	Dimensional de torque, en libras – pie
<b>qq</b>	Dimensional de peso, quintal, 1 qq = 100 libras.
<b>BTU</b>	Dimensional de energía, en inglés <i>British Thermal Unit</i> .

$\sigma$	Sigma, símbolo estadístico de la desviación estándar.
<b>Cp</b>	Dimensional, del índice de Capacidad del proceso.
<b>kW</b>	Dimensional de potencia eléctrica, kilo – watt
<b>psi</b>	Dimensional de presión, <i>pounds per square inch</i> en inglés y libras por pulgada cuadrada en español
<b>psig</b>	Dimensional de presión manométrica, <i>pounds per square inch gauge</i> en inglés y libras por pulgada cuadrada manométricas en español

## GLOSARIO

<b>Vírgenes</b>	Armaduras laterales que soportan todos los componentes de un molino cañero.
<b>Molino cañero</b>	Molino que sirve para extraer el jugo de la caña.
<b>Mazas</b>	Rodillos cilíndricos que sirven para triturar la caña dispuestos en forma triangular.
<b>Maza superior</b>	Rodillo de un molino cañero colocado en el vértice superior del triángulo formado por las mazas.
<b>Maza cañera</b>	Rodillo de un molino cañero del lado que entra la caña al molino.
<b>Maza bagacera</b>	Rodillo de un molino cañero del lado que sale la caña del molino.
<b>Cuarta maza</b>	Rodillo alimentador de un molino cañero situado al lado de la maza superior en la entrada de la caña.
<b>Maza lotus</b>	Maza de diseño especial con mayor capacidad de drenaje

de jugo.

<b>Rayado</b>	Torneado de ranuras con vértice triangular sobre la superficie de las mazas similar a la rosca de un tornillo.
<b>Muñones</b>	Sección circular de las mazas que asienta sobre las chumaceras
<b>Chumaceras</b>	Cojinetes donde se soportan y rotan las mazas.
<b>Meshes</b>	Ranuras que se hacen en los fondos de los dientes que ayudan a drenar el jugo.
<b>Chevrones</b>	Cortes en espiral que se hacen en los dientes de las mazas para facilitar la alimentación de caña.
<b>Peines</b>	Piezas de acero o hierro fundido de diseño especial que sirven para limpiar el fondo de los dientes de las mazas.
<b>Coronas</b>	Engranajes para molinos sin dientes normalizados.
<b>Catarina</b>	En una transmisión por engranes el engranaje de mayor diámetro.
<b>Piñón</b>	En una transmisión por engranes el engranaje de menor diámetro.
<b>Cola de milano</b>	Espiga de forma especial para encajar dos piezas.

<b>Repotenciación</b>	Agregar potencia a una máquina.
<b>Turbogenerador</b>	Máquina que convierte la energía térmica en energía eléctrica.
<b>Entredos</b>	Barra de sección cuadrada que transmite la potencia de las transmisiones al molino.
<b>Interfase</b>	Pantalla y teclado de un sistema de control electrónico que permite manejar un menú de opciones.
<b>Encoder</b>	Disco codificado con marcas impresas digitalmente, convierte el movimiento giratorio de un eje en un código digital.
<b>Pol del bagazo</b>	Sacarosa aparente en el bagazo.
<b>Humedad del bagazo</b>	Cantidad de agua remanente en el bagazo después de pasar por los molinos.
<b>Agua de imbibición</b>	Agua, generalmente caliente, que se aplica al bagazo que entra al último molino para facilitar la extracción de sacarosa.
<b>Sacarosa</b>	Compuesto químico puro, llamado también azúcar de caña.
<b>Capacidad del proceso</b>	Técnica estadística que analiza la capacidad que tiene el proceso de entregar las características deseadas y las compara contra los parámetros fijados por el cliente o la empresa.

## RESUMEN

Tradicionalmente en los ingenios azucareros cuando se presenta la necesidad de aumentar la capacidad de las transmisiones de potencia de los molinos cañeros la primera opción que se contempla es la sustitución de las transmisiones actuales por otras de mayor capacidad y del mismo tipo.

Debido a las grandes dimensiones de los equipos que componen las transmisiones, en los ingenios esto representa un gran problema ya que tanto el edificio como las cimentaciones de los molinos en la mayoría de los casos están diseñados para los equipos existentes.

Actualmente se puede utilizar tecnología alterna consistente en Transmisiones hidrostáticas desarrolladas específicamente para aplicarlas en molinos cañeros.

El objetivo de este trabajo de graduación es describir los componentes de una transmisión tradicional, los equipos que componen un sistema hidráulico y como estos se integraron con un sistema de control hasta convertirse en transmisiones hidrostáticas confiables para molinos de caña y, la propuesta, utilizando parámetros de operación y fórmulas azucareras, de una transmisión hidrostática del tamaño adecuado para los requerimientos de molienda del ingenio.

También se desarrollan ejemplos de cómo se puede aprovechar la flexibilidad de la transmisión hidrostática para mejorar las características de calidad, pol y humedad del bagazo para ahorrar combustible o generar, con



ese combustible ahorrado, energía eléctrica que se puede vender a la red nacional, generando ingresos extras al ingenio.

## **OBJETIVOS**

### **■ General**

Aplicar una transmisión hidrostática que sustituya parcialmente la transmisión de un molino cañero para disminuir el riesgo de roturas, el consumo de vapor, mejorar las características de calidad y aumentar la confiabilidad y eficiencia de la operación de los molinos.

### **■ Específicos**

1. Describir los componentes de una transmisión tradicional de los molinos cañeros.
2. Presentar los diferentes equipos, bombas, motores hidráulicos y los accesorios que componen un sistema hidráulico.
3. Describir como se diferencian los sistemas hidráulicos estándar de los sistemas hidráulicos de alto torque y baja velocidad.
4. Establecer el tamaño de la transmisión hidrostática que se propone aplicar en una maza de un molino.
5. Definir las actividades y requerimientos que previamente se deben cumplimentar para la aplicación de la transmisión hidrostática.

6. Definir los equipos mínimos necesarios para la correcta protección, control y automatización de la operación de la transmisión hidrostática en funcionamiento.
7. Analizar las ventajas económicas del uso de la transmisión hidrostática en el mejoramiento de diferentes características de calidad propias del trabajo de los molinos.
8. Servir de referencia a los profesionales involucrados en la operación y dirección de una planta industrial que utilicen transmisiones de gran tamaño y que necesiten aumentar la potencia de sus transmisiones actuales.
9. Despertar la inquietud en profesionales de la industria azucarera para la implementación y análisis del uso de transmisiones hidrostáticas.

## INTRODUCCIÓN

En los ingenios azucareros generalmente se han utilizado transmisiones de potencia en las cuales el vapor generado por las calderas sirve para impulsar una turbina, regularmente de una etapa, que a través de una serie de reducciones por engranes mueve el molino.

Las transmisiones de potencia de los molinos cañeros en el ingenio motivo de este trabajo operan en su límite de potencia lo que da por resultado un desgaste progresivo en los reductores de velocidad y mayor consumo de vapor en las turbinas. Para proteger las transmisiones antes de que su deterioro sea irreversible y disminuir el consumo de vapor se necesita tomar acciones que permitan mantener o aumentar la capacidad de las transmisiones y ahorrar energía térmica.

Tradicionalmente en ese momento se piensa en sustituirlas por otras de mayor capacidad. Las transmisiones de este tipo por su diseño a mayor capacidad tienen mayor tamaño. Las cimentaciones y el edificio de los molinos en los ingenios desde su origen, debido a su alto costo, están diseñados de acuerdo al tamaño de las transmisiones y los molinos. Por lo anterior cambiar las transmisiones a otras de mayor tamaño es bastante difícil y oneroso.

El objetivo del presente trabajo de graduación es presentar la opción que se tiene actualmente de utilizar tecnología alterna consistente en una

Transmisión hidrostática para la sustitución parcial o total de las transmisiones de los molinos cañeros.

Inicialmente se hace una descripción de los componentes de una transmisión de potencia; turbina, reductores de velocidad, el molino propiamente dicho y sus accesorios para que se comprenda la magnitud de los cambios que implica sustituir sus transmisiones.

Luego se mencionan las características de los diferentes tipos de bombas, motores hidráulicos y sus accesorios y como los principios básicos de operación de estos equipos interrelacionan las variables presión, velocidad, flujo y torque que sirven para diferenciar un sistema estándar de un sistema de alto torque; y baja velocidad requerido para trabajar en un molino cañero.

En el siguiente punto, se describen todas las actividades que previamente deben llevarse a cabo para aplicar la transmisión hidrostática propuesta. Esto incluye modificaciones a los eje de las mazas, definir el espacio físico necesario para la transmisión, la disponibilidad de energía eléctrica del ingenio y los equipos de automatización necesarios. Cumplimentadas esas actividades, se analizan las ventajas que se espera obtener con la aplicación: ahorro de energía térmica, potencia adicional y aumento de la extracción de azúcar.

Debido al alto grado de confiabilidad que se le exige a la transmisión hidrostática, es necesario definir la forma en que las variables de operación que son parte de la transmisión hidrostática y las propias del molino se deben integrar por medio del sistema de control.

Finalmente, se establecen los controles y rangos para las variables que sirven para optimizar el funcionamiento de la transmisión en el molino. Se analiza el monitoreo de una característica de calidad, pol del bagazo y su importancia económica. También se plantea la importancia de analizar otras

características, humedad del bagazo y agua de imbibición que bien controladas pueden reportar beneficios económicos al ingenio.

## **1. TRANSMISIONES DE POTENCIA TRADICIONALES EN UN MOLINO CAÑERO**

### **1.1 Componentes principales de un molino cañero**

Los componentes de un molino cañero cualquiera que sea su tipo o tamaño son: vírgenes, mazas y sus ejes cuchilla central y accesorios. Entre estos últimos se mencionan los que son más comunes, cabezotes hidráulicos, chumaceras o cojinetes, peines, etc.

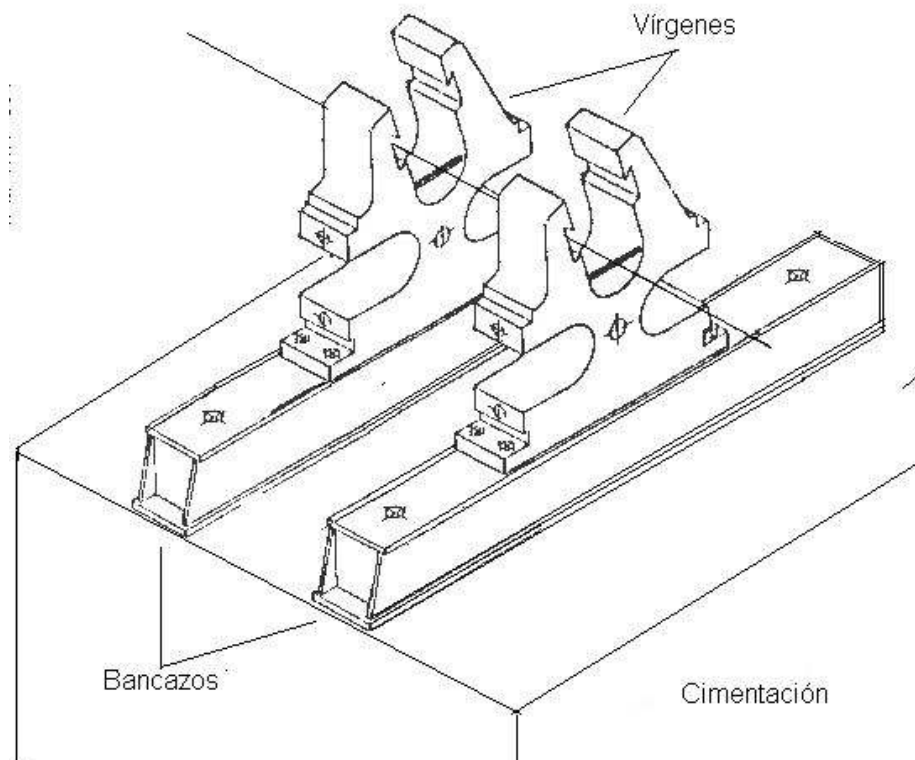
#### **1.1.1 Vírgenes**

Un molino cañero tiene dos vírgenes que son esencialmente las armadura laterales, de diseño especial, que soportan las mazas y todos los accesorios del molino. Es posible que por su forma tan especial y única se les dio ese nombre en nuestros países, y se entenderá mejor al ver la figura1. Las vírgenes son armaduras muy pesadas, del orden de 8 a 12 toneladas cada una, construidas de acero al carbono fundido, como el ASTM A27/65-35, y que se colocan paralelas entre sí a una distancia especificada. La mayoría van montadas sobre bancazos de hierro a los que se atornillan. Los bancazos a su vez se

sujetan a los cimientos de concreto por medio de pernos de diámetro y largo calculados de acuerdo al tamaño del molino.

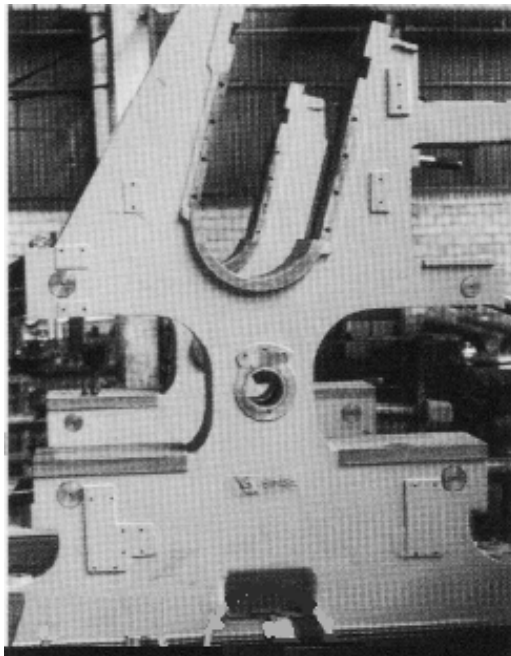
En este punto vale mencionar que el cimiento de los molinos es de concreto del tipo masivo y es él más grande y fuerte de todo el ingenio. El diseño de las vírgenes define el tipo y el numero de mazas del molino. La distancia paralela entre las dos vírgenes está definida por el largo de las mazas y la distancia entre los centros de sus muñones y el tamaño del molino propiamente. En la figura 1, se muestran las vírgenes alineadas sobre sus bancazos y su cimiento.

**Figura 1. Vírgenes y sus bancazos**

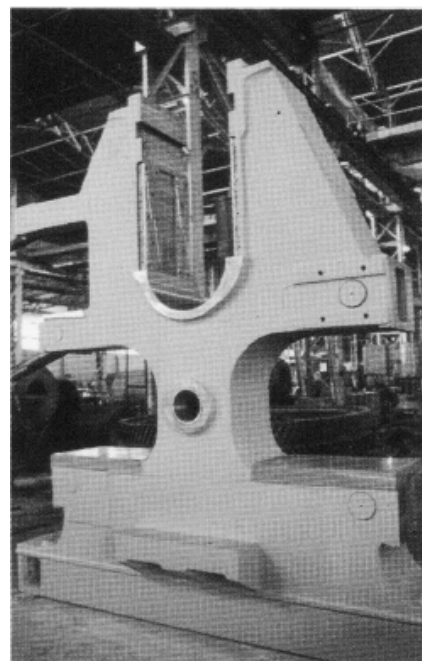


Existen diferentes tipos de vírgenes, las más usadas son conocidas como tipo recta y tipo inclinada. La diferencia entre el tipo recto y el inclinado radica principalmente en la forma en que cada uno soporta y distribuye el peso de las mazas y como absorbe las reacciones de las fuerzas originadas en la operación de molienda, en función de su configuración. En las vírgenes inclinadas las caras laterales donde entra la maza superior tienen regularmente una inclinación de 15 grados respecto de la vertical. En la figura 2, se muestran los tipos inclinada y recta.

**Figura 2. Tipos de vírgenes**



V Virgen tipo inclinada

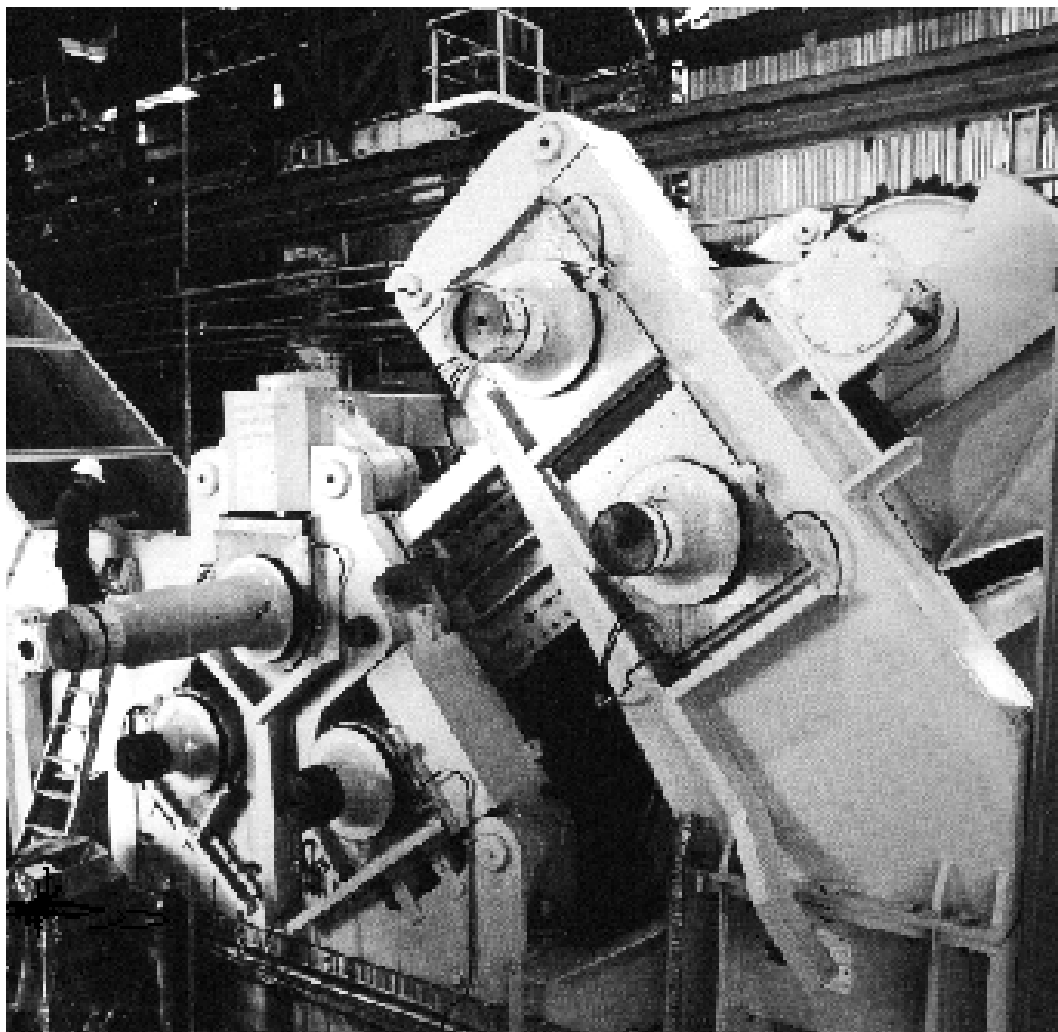


Virgen tipo recta

Fuente: Catálogo **SIMISA**, p. 2

Respecto al número de mazas hay molinos con vírgenes para tres, cuatro, cinco y seis mazas. Los más usados son los de tres y cuatro mazas aunque, últimamente ya hay en el país molinos de seis mazas. La figura 3, muestra un molino con seis mazas.

**Figura 3. Molino de 6 mazas**



Fuente: Catálogo **Bundaberg Foundry**, p. 8, 9.



En cuanto al tamaño de los molinos existen muchos y diferentes de acuerdo a cada fabricante. Las medidas de los tamaños más comunes y que se pueden tomar como normalizadas, se listan en la Tabla I a continuación.

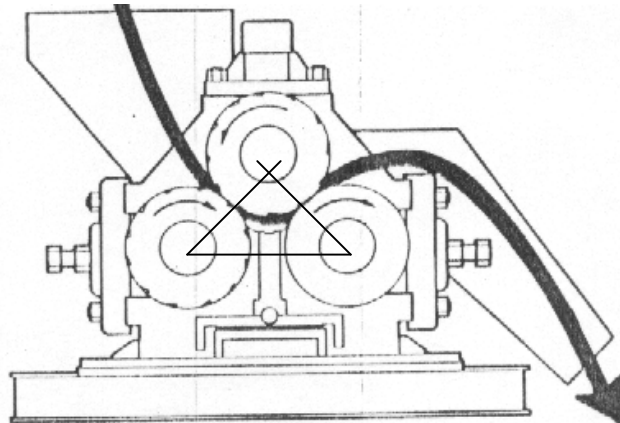
**Tabla I. Tamaños más comunes de molinos cañeros**  
(Diámetro X Largo, en pulgadas)

24 X 48	34 X 72	42 X 90
30 X 60	36 X 78	46 X 98
32 X 66	40 X 84	50 X 102

Las dimensiones mostradas, se refieren: el primer número al diámetro de las mazas y el segundo al largo de las mazas. Por ejemplo, al hablar de un molino de 40 X 78 se entiende que las mazas tienen 40 pulgadas de diámetro y 84 pulgadas de largo.

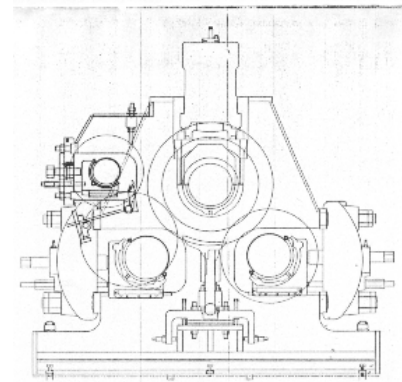
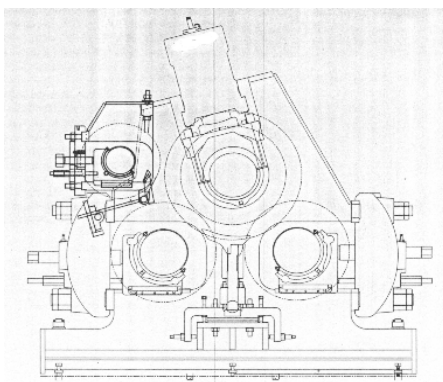
El diseño básico de los molinos en los ingenios hasta hace pocos años fue el molino de tres mazas. En un molino de este tipo las mazas están dispuestas formando un triángulo isósceles, ya que esta configuración proyecta el peso de las mazas directamente sobre el cimiento y no sobre las tapas laterales. En la figura 4, se muestra el diseño básico de un molino de tres mazas.

**Figura 4. Molino de tres mazas.**



En años recientes a este diseño se le fueron agregando más mazas buscando más puntos de extracción del jugo de la caña en el mismo molino. En el ingenio citado en este trabajo hay seis molinos, cinco de ellos son de vírgenes rectas, como el de la figura de la derecha abajo, y uno de virgen inclinada, lado izquierdo abajo, y todos tienen cuatro mazas similares a los de la figura 5.

**Figura 5. Molinos de cuatro mazas**



Fuente: Catálogo **Fulton**, Molinos, paginas 8 y 9.

Un molino de cuatro mazas conserva el diseño de uno de tres pero, se le agrega una cuarta maza paralela a la maza de arriba del lado de la entrada de caña. Esta cuarta maza hace la función de un rodo alimentador forzado.

Por su posición en las vírgenes de un molino cada maza recibe un nombre que la identifica y diferencia de las demás. A la maza de arriba (vértice superior del triángulo) se le llama maza superior y es la que recibe la acción de la transmisión de potencia. Esta maza a su vez, es la que mueve a las dos de abajo y la cuarta maza. En el lado de entrada de la caña al molino se encuentra la maza cañera y del lado de la salida esta la maza bagacera. Para mantener las mazas a la distancia requerida entre ellas, de acuerdo a la cantidad de caña que se quiera moler, los alojamientos en las vírgenes por donde entran las mazas, se cierran; en el caso de las mazas inferiores y la cuarta maza con tapas laterales llamadas monos. Estas tapas van atornilladas o con pasadores a las vírgenes. En el caso de la maza superior esta se encierra con un cabezote hidráulico. La función y descripción del cabezote hidráulico y las tapaderas laterales o monos se explicará posteriormente en la parte de accesorios.

### **1.1.2 Mazas y sus ejes**

Las mazas de un molino en realidad son cilindros de diseño y materiales específicos para la molienda de caña. Cada maza de un molino cañero está compuesta de un eje de acero forjado, bajo especificaciones propias para ese trabajo, sobre el cual se encaja a presión o en caliente una camisa de hierro de

fundición gris. Originalmente las camisas se fabricaban lisas y actualmente tienen ranuras circulares distribuidas en su largo.

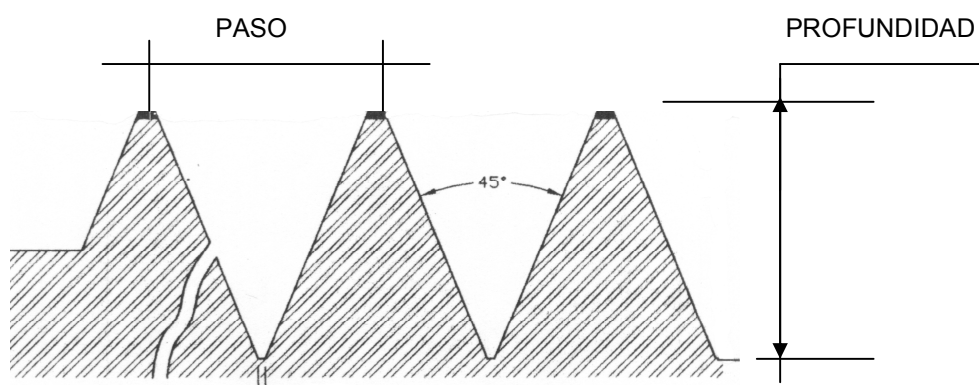
Ese cambio se debe a que la capacidad de un molino con camisas lisas es mucho menor que la de un molino del mismo tamaño trabajando a la misma velocidad pero con camisa con ranuras.

En las camisas de hierro fundido se tornean ranuras describiendo círculos completos en un plano perpendicular al eje y distribuidos regularmente a lo largo de toda la camisa. 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. A cada triángulo formado se le llama "diente" y al conjunto total de dientes a lo largo de la camisa se le denomina rayado de la maza. Los dientes son especificados por su paso y su ángulo. La profundidad es la altura medida de la punta al fondo del diente. El paso es la distancia entre centros de las puntas de dos dientes consecutivos. Para definir el rayado de una maza, se hace referencia al ángulo y el paso de los dientes. Por ejemplo, al decir que una maza tiene un rayado de 3" X 45 ° grados, se entiende que el paso es de tres pulgadas y el ángulo de los dientes es de cincuenta grados.

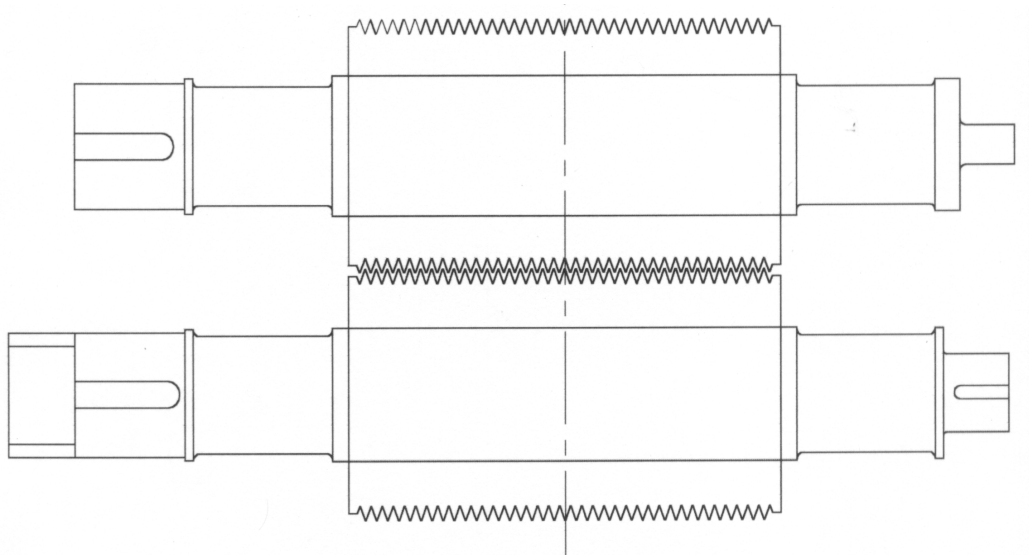
En un molino con mazas de rayado normal el paso de todas las mazas es el mismo y sólo cambia el ángulo de los dientes de la superior con alguna de las otras. La maza superior tiene el rayado de modo que la punta de un diente esta exactamente al centro de la camisa y partiendo de ese centro se distribuyen los demás dientes hacia los extremos. En las demás mazas en el centro de la camisa coincide el fondo de dos dientes consecutivos. Esa diferencia en la posición de los dientes de la maza superior con las otras permite que los dientes encajen o se traslapen al acercarse las mazas. Por lo anterior, se dice que la maza superior tiene rayado macho al centro y que las otras son hembra al centro.

La importancia del encaje o traslape de los dientes es que permite dividir la caña en pedazos más pequeños en su paso entre las mazas y eso facilita la extracción del jugo en los molinos subsiguientes. En la figura 6, se muestra el detalle de los dientes y el traslape del rayado de las mazas superior e inferior.

**Figura 6. Detalle de dientes y rayado de mazas superior e inferior.**



Detalle de dientes.

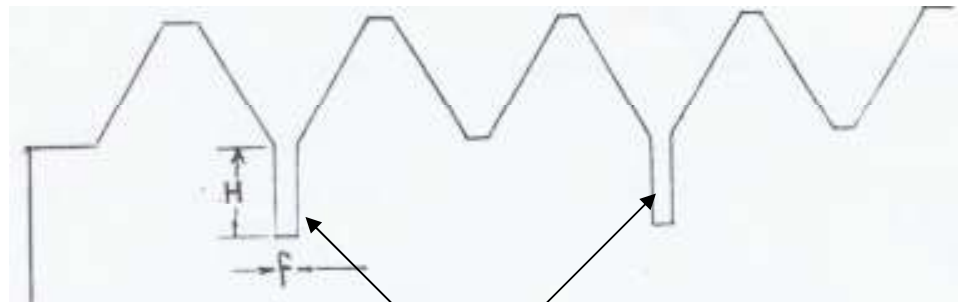


Detalle de rayado y traslape de dientes.

Para facilitar la salida del jugo de la caña, al pasar éste entre las mazas, a las mazas se les hacen unas ranuras llamadas *MESCHAERT* (*MESHER*).

**Las ranuras mesher**, se hacen radialmente partiendo del fondo de los dientes hacia el centro. Estas ranuras varían de tamaño según las dimensiones de la maza y el concepto del diseñador. Se especifican de acuerdo a su ancho y la profundidad medida a partir del fondo del diente. Cada diseñador recomienda según su experiencia, el tamaño, cantidad y distribución a lo largo de la maza. Así, pueden ir alternas o en todos los dientes pero todos coinciden en que se hagan en la cuarta maza y en la cañera y nunca en la bagacera. La razón para no hacerlas en la bagacera es la poca cantidad de jugo en ese lugar, la cantidad de bagazo fino que se va al jugo y que la presión en esa zona es muy alta y pueden fracturarse los dientes vecino a los mesher. Las medidas usadas regularmente son de  $3/16$  y  $1/4$  de pulgada de ancho y  $3/4$  a 1 pulgada de profundidad. La figura 7, muestra un ejemplo de ranuras mesher.

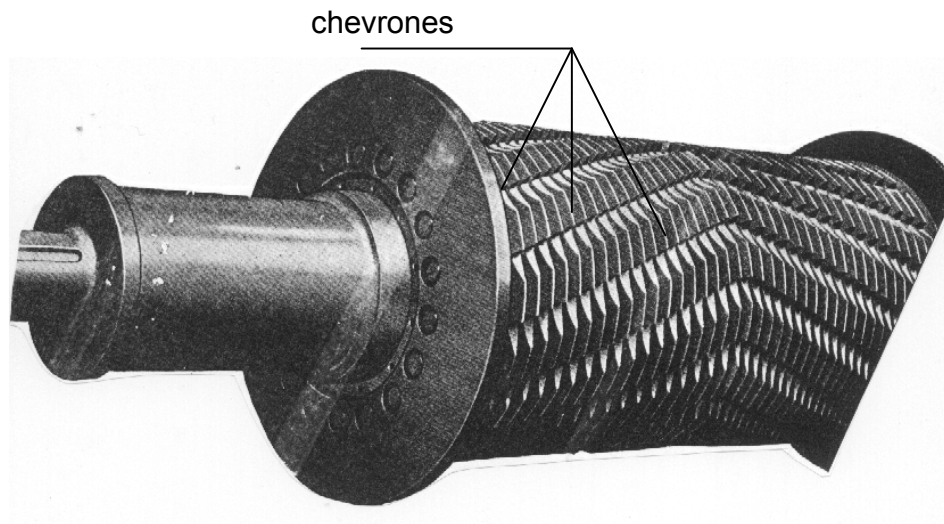
**Figura 7. Ranuras mesher**



Ranuras mesher.

Debido a que el primer molino recibe la caña más entera se acostumbra hacerle cortes especiales a los dientes de las mazas cañera y superior. Este grupo de cortes tienen como finalidad facilitar la alimentación de caña al molino y recibe el nombre de **Chevrones**. Los cortes son hechos en los dientes de modo que describen una hélice desde el centro hasta los extremos de la maza en forma simétrica. Cada diseñador recomienda usar un determinado número de cortes con ángulos entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$  de manera que su paso (que es la distancia desde el extremo de un corte al extremo del siguiente, medido circunferencialmente) genere entre 12 y 16 cortes sobre la superficie de la maza. Es necesario aclarar que los chevrones en la maza superior tienen la hélice desarrollada en sentido contrario a los de la maza cañera pero las dos mazas los tienen en el sentido de rotación en que se mueven en el molino. La forma de los chevrones se ve en la figura 8.

**Figura 8. Chevrones**

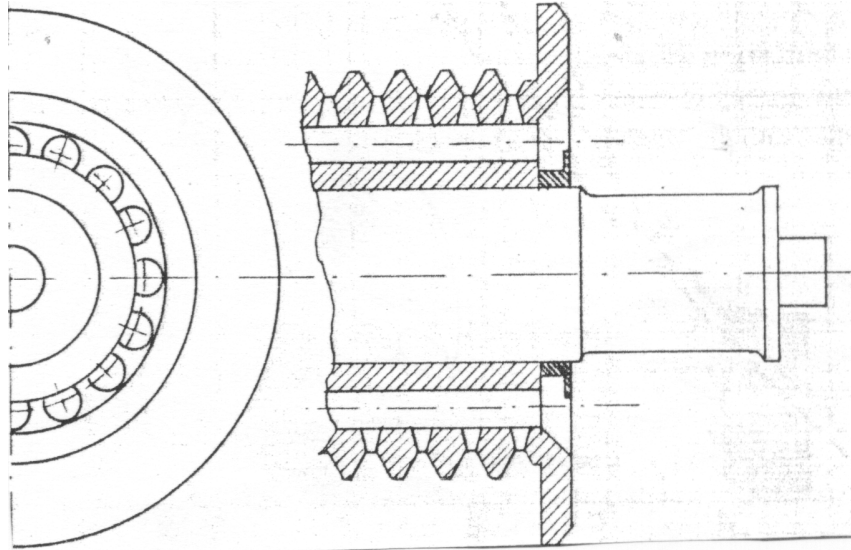


Fuente: Revista **Sugar y Azúcar**, Yearbook 1968, Rollers, p. 112.

**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, al eje se le hacen canales longitudinales, repartidos en su circunferencia exterior en la parte 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. En la figura 9 se muestra la maza lotus.



**Figura 9. Maza Lotus**



Fuente: **E. Hugot**, Handbook, Second edition, p. 275.

**Soldadura en las Mazas.** Actualmente para ayudar a mantener constante la alimentación del molino además de los chevrones, que sólo se acostumbran en los dos primeros molinos, se acostumbra depositar soldadura en forma de puntos (simulando granos) en las puntas y caras de los dientes. La soldadura que se usa es del tipo de recubrimiento duro con alto contenido de cromo y dureza entre 55 y 65 grados de dureza en la escala Rockwell C.

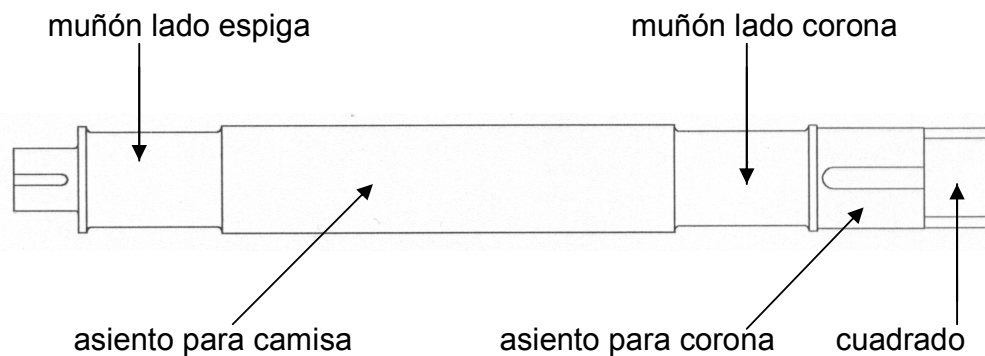
**Ejes de las mazas.** Los ejes de las mazas de los molinos cañeros son especificados especialmente para ese trabajo. Normalmente se especifican bajo la norma ASTM 1045 ó 1042 y forjados, normalizados, alineados, homogenizados, de grano fino y con certificados de prueba no destructiva de ultrasonido. Normalmente se compran las barras cilíndricas y en el ingenio se les dan las dimensiones a las diferentes secciones de acuerdo a su posición en el molino. Si el eje se prepara para una maza superior las diferentes 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 y bagacera. Sigue la sección que sirve de muñón, que asienta sobre la chumacera o cojinete. A continuación la parte donde va montada la camisa de hierro fundido y luego 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.

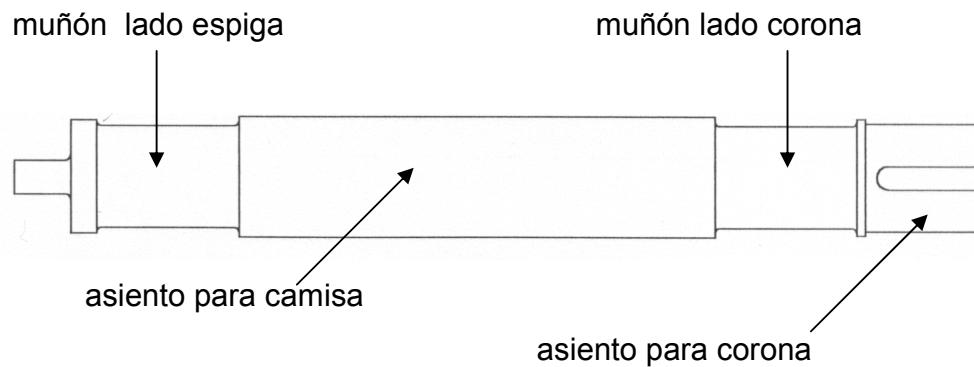
Si el molino usa motor hidráulico la sección para corona de cuarta maza se aprovecha para ese fin dándole más longitud. El diseño de los ejes superior e inferior se muestran en la figura 10.

**Figura 10. Diseño de ejes de mazas.**

**Eje Superior**



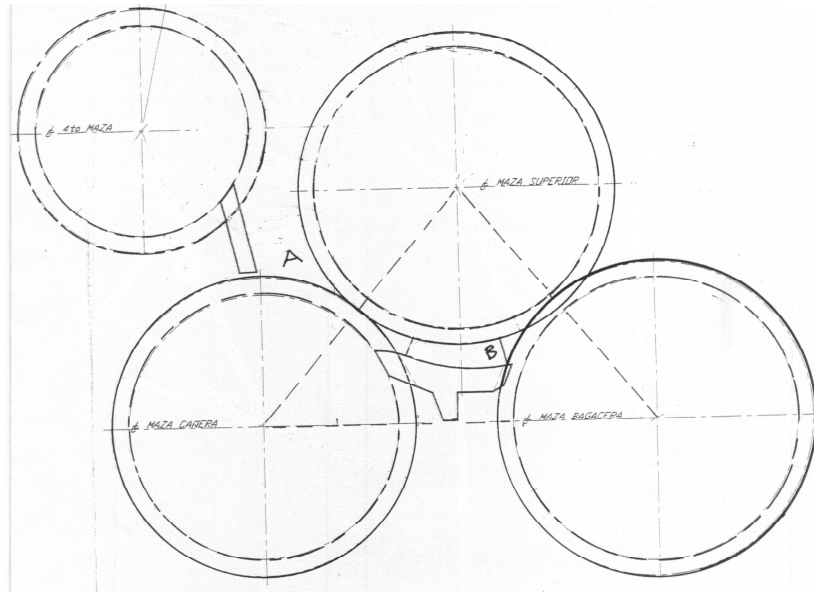
### Eje Inferior



#### 1.1.3 Cuchilla central y peines

Debido a los requisitos de diseño estructural, en la construcción de las vírgenes, entre las dos mazas inferiores queda un espacio vacío por el cual debiera seguir su curso la caña al pasar entre el molino. Ese espacio es donde va colocada la cuchilla central. La finalidad de la cuchilla central es llenar ese espacio, a todo lo largo de las mazas, de modo que el flujo de caña sea continuo y el diseño de su perfil permite hacerlo con la menor fricción. El diseño del perfil de la cuchilla central requiere de mucha experiencia y conocimiento de molinos. El paso de la caña se inicia en la zona comprendida tangencialmente entre la maza superior y la cañera y termina entre la maza superior y bagacera. En la figura 11, se denota con los puntos A y B respectivamente.

**Figura 11. Posición de la cuchilla central en las mazas.**

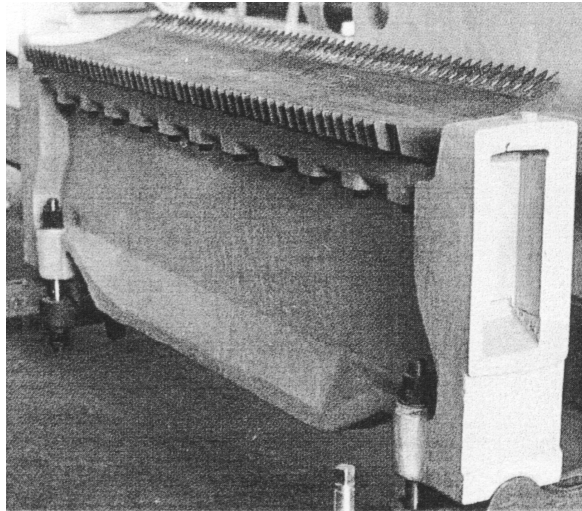


El extremo de la cuchilla del lado de la maza cañera tiene un rayado que engrana o traslapa con el rayado de la maza cañera y va ajustado a ésta en el fondo de los dientes. Del lado de la maza bagacera el rayado de la cuchilla es de dientes cortos y no traslapa con el rayado de la maza bagacera, solo se aproxima.

La abertura en la entrada, entre la punta de la cuchilla y la maza superior y en la salida, entre la cola de la cuchilla y la bagacera se establecen en función del tipo de vírgenes, cantidad de caña a moler, diámetro de las mazas, etc. Por su posición, justo debajo de la maza superior, la cuchilla central debe soportar la carga hidráulica aplicada a la maza superior más el peso uniformemente distribuido de la maza superior. Debido a lo anterior, la cuchilla central va soportada en toda su longitud, por una pieza sólida de acero, llamada puente. La cuchilla se atornilla al puente en la parte superior y el puente en sus

extremos inferiores va soportado en la parte central de la base de las vírgenes. En la figura 12, se observa una cuchilla central y su puente.

**Figura 12 Cuchilla central y puente.**



Fuente: Catálogo **SIMISA**, Mills, p. 3.

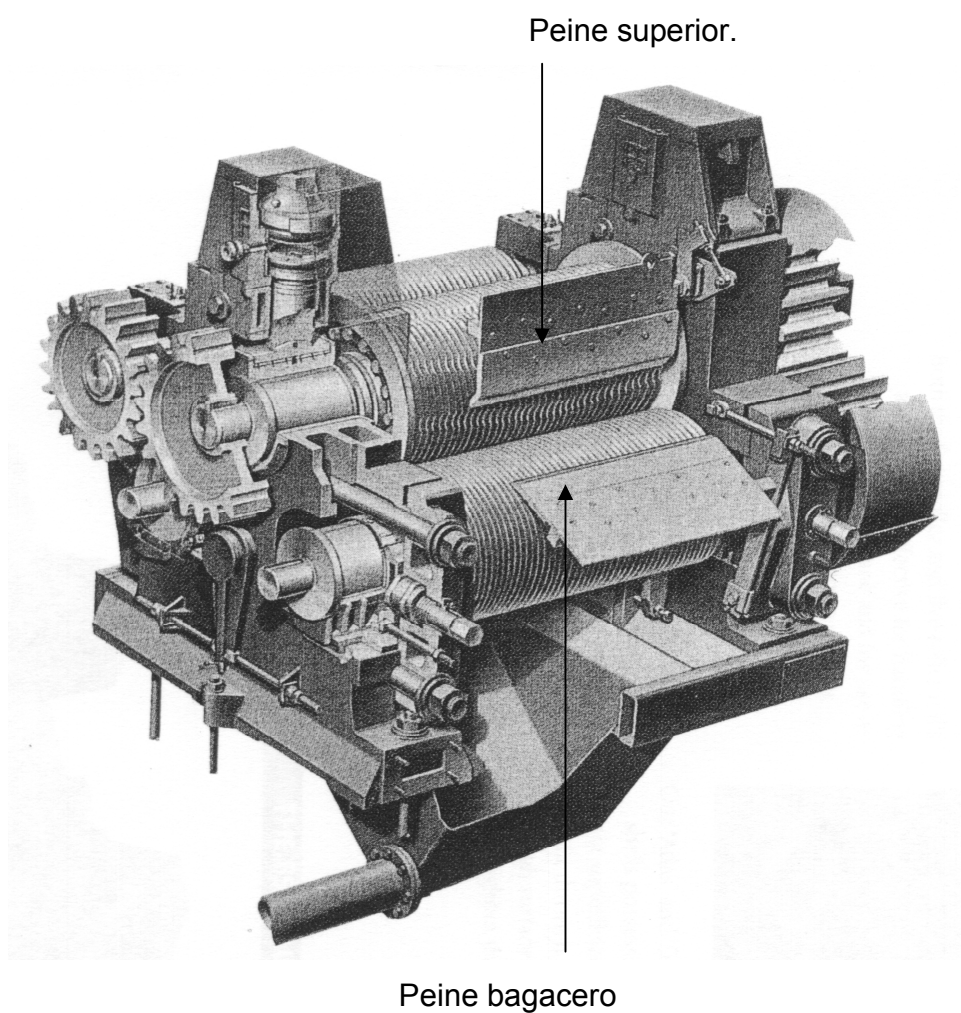
En el espacio comprendido entre las tangentes de las mazas superior y cañera, superior y bagacera se presentan las zonas de más alta presión y la fibra de la caña se mete entre los dientes. Si no se quita esa fibra de caña se llenaría el rayado, las mazas quedarían como cilindros lisos; para desprender esa fibra se colocan los peines o raspadores.

Los peines son piezas de acero o hierro fundido que tienen un perfil especial, similar a una hoz alargada, y el largo igual al de las mazas. En el extremo de la punta, en toda su longitud, tienen un rayado con un ángulo ligeramente menor al ángulo de rayado de las mazas. El ángulo permite que la punta de los dientes del peine se ajuste contra los fondos de los dientes de las mazas. Las puntas de los dientes del peine están colocadas tangencialmente a la maza y en contra de su rotación. El desprendimiento de la fibra de caña, que llenó el rayado de la maza, ocurre cuando la maza en su rotación pasa por el peine. En el otro extremo el peine va atornillado a una lámina la que a su vez

va atornillada a un eje cuadrado que lo soporta. El eje cuadrado tiene sus extremos cilíndricos los cuales entran en chumaceras sujetas a las vírgenes y brazos de palanca tensionados por resortes. Ese tipo de montaje permite que el peine “siga” a la maza superior cuando ésta flota.

Si el peine trabaja en la maza superior se le conoce como peine superior y en la maza bagacera como peine bagacero. En la figura 13, se aprecia la forma y la posición de los peines en las mazas.

Figura 13. Posición de peines en las mazas



Fuente: Catálogo **Fletcher Smith**, The FS Mill, p. 5.

#### 1.1.4 Accesorios

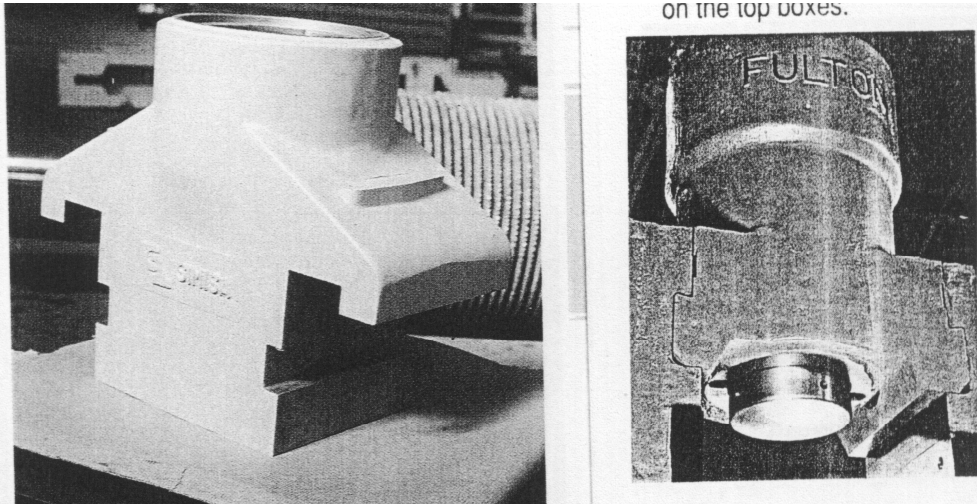
Son las partes que complementan a las vírgenes para conformar un molino. Todos tienen su importancia y aunque hay de diferentes diseños sirven para el mismo fin en cualquier molino.

**Cabezotes hidráulicos.** Los cabezotes hidráulicos tienen como función mantener una presión constante prefijada e independiente sobre la maza superior para mantener su movimiento vertical uniforme no importando la fluctuación de la carga. Los cabezotes van colocados, uno en cada virgen, cerrando el alojamiento donde entran los muñones de la maza superior. Son de construcción muy robusta y en su parte exterior van encajados por medio de salientes con forma de cola de milano a las vírgenes. En su interior tienen una cámara de aceite dentro de la cual se desplaza un pistón. El pistón recibe la presión hidráulica proveniente de una bomba hidráulica, independiente de los molinos, la cual mantiene constante un acumulador hidráulico. El acumulador es un cilindro metálico, similar a un cilindro de oxígeno, construido para soportar altas presiones internas, hasta 20,000 psig., dentro del cual está una vejiga especial la cual se precarga con nitrógeno seco. 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. En la figura 14, se observan dos diseños de cabezote y un acumulador hidráulico.



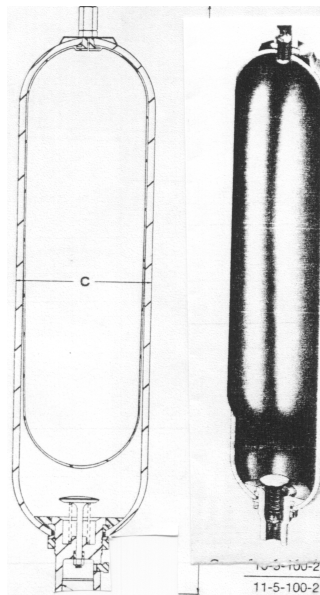
**Figura 14. Cabezote hidráulico y acumulador**

Cabezotes



Fuente: Catálogos **Simisa**, Mills, p. 6 y **Fulton**, Mills, p. 4.

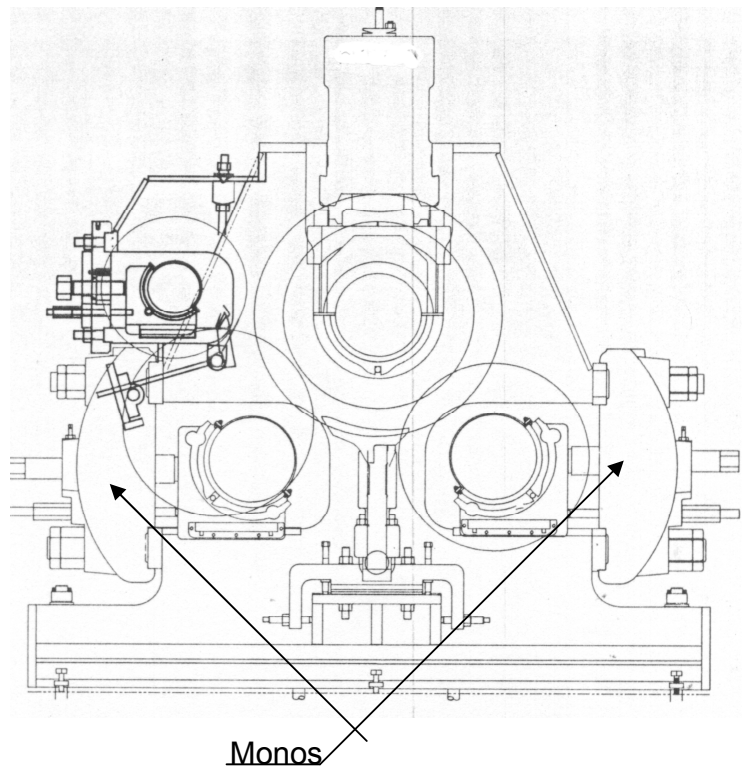
Acumulador



Fuente: Catálogo **Edwards**, Accumulators, p. sin número.

**Tapaderas laterales o monos.** La función de las tapaderas laterales o monos es soportar las reacciones de las fuerzas horizontales sobre las mazas inferiores. Prácticamente se les llama monos a las tapaderas que encierran los alojamientos de las mazas inferiores. Cada virgen tiene cuatro monos, dos cañeros y dos bagaceros. Los monos se sujetan a las vírgenes por medio de tornillos pasantes o con pasadores. La figura 15 muestra los monos o tapaderas laterales.

**Figura 15. Tapaderas laterales o Monos**

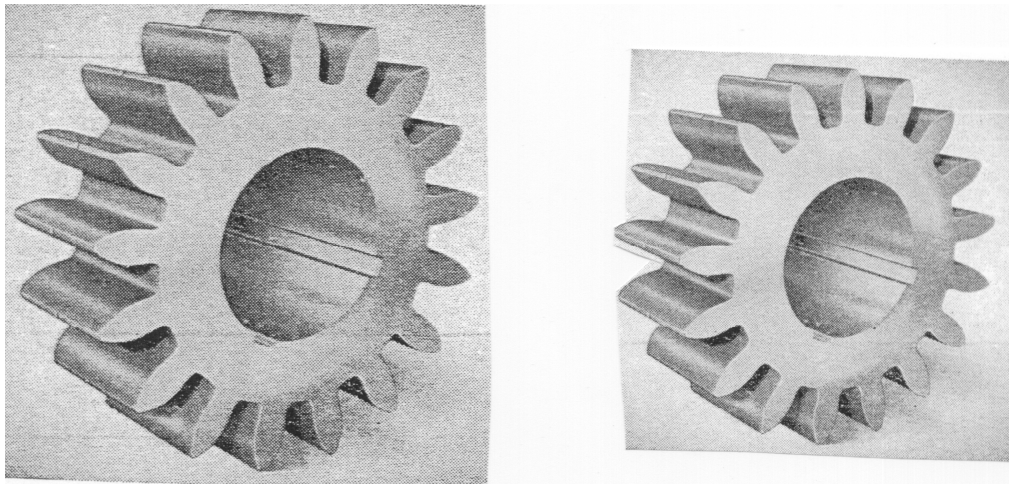


Fuente: Catalogo **Simisa**, Mills, p. 4.

**Coronas.** La función de las coronas es transmitir la rotación de la maza superior a las otras mazas.

Las coronas son básicamente engranes con dientes de forma especial tallados sin cumplir con módulos de paso normalizado. Por su diseño permiten usar diferentes distancias entre centros de las mazas. Por ejemplo, cuando la maza superior se levanta (flota) por la carga, los dientes aún conservan suficiente área en contacto para transmitir completamente la potencia aplicada. Ver figura 16 de coronas.

**Figura 16 Coronas.**



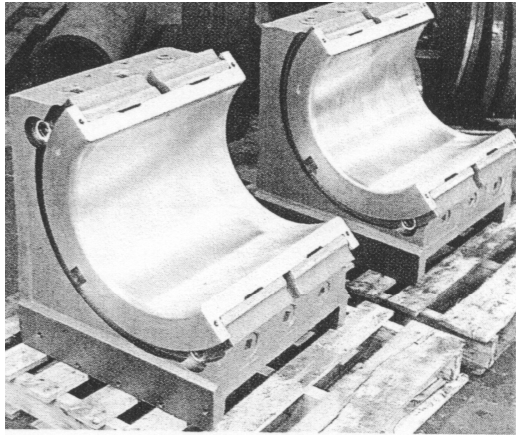
Fuente: Revista **Sugar y Azúcar**, Yearbook 1968, p. 124.

**Chumaceras.** Las chumaceras o cojinetes son los soportes sobre los cuales se apoyan y giran los muñones de las mazas. En un molino se utilizan de dos tipos, superiores e inferiores. Las superiores son para la maza superior, se componen de dos partes, una parte, es una caja con la parte de arriba plana y la de abajo en forma semicircular para alojar el muñón, puede ser de acero con un buje de bronce encajado en el semicírculo o toda de bronce. La otra parte, es un buje semicircular de bronce que se pone sobre la virgen. La caja superior entra ajustada en el alojamiento, donde entra el muñón de la maza en la virgen, y se mueve hacia arriba y hacia abajo con la maza. La caja en la parte plana superior recibe la presión del pistón del cabezote hidráulico y en la parte inferior donde es semicircular, encaja en la mitad superior del diámetro del muñón. En el buje semicircular de abajo descansa la maza cuando esta en su posición mas baja, sin carga. Cuando la maza superior se levanta por efecto de la carga, el muñón presiona sobre la caja superior, no hace contacto con el buje de abajo. Las chumaceras inferiores son de forma especial que se comprende al ver la figura 17. Pueden ser todas de bronce o tener la caja de acero y el buje de bronce.

La construcción de las chumaceras, aparte de tener que ser robusta, es muy complicada ya que en su interior deben tener canales por los que entra y circula agua que servirá para enfriamiento absorbiendo el calor generado entre el eje, el lubricante y el bronce, por las altas cargas al rotar las mazas. Ver figura 17 de chumaceras inferiores y superiores.

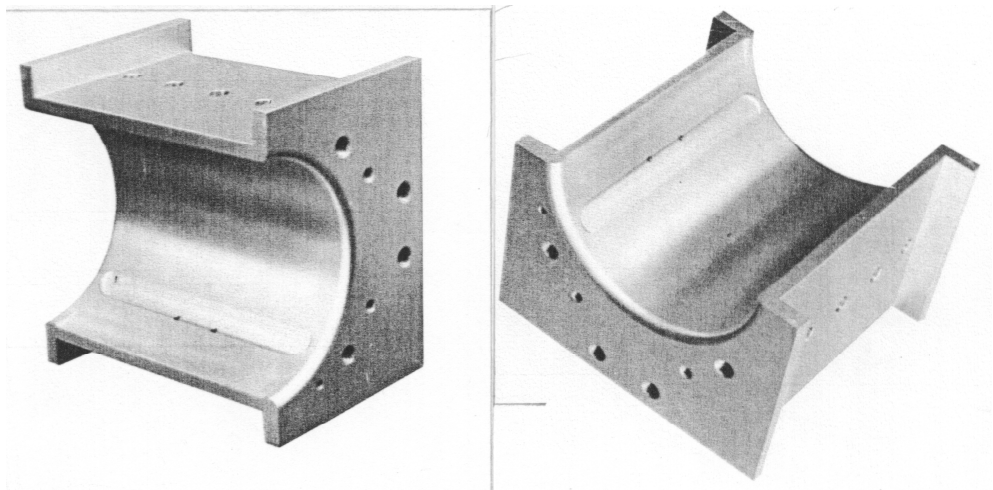
**Figura 17. Chumaceras inferiores y superiores**

Inferiores



Fuente: Catálogo **Fulton, Mills**, p. 7

Superiores



Fuente: Panfleto **U.S. Bronze Foundry & Machine, Inc.** p. 2

**Equipos de lubricación.** Para la lubricación de los muñones de las mazas y las coronas se utilizan equipos de lubricación centralizada con *timer* incorporado. Estos equipos consisten de 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 al rendimiento del lubricante y la carga del molino. Los lubricantes que se usan son fabricados especialmente para uso en molinos de caña.

**Cuchilla de cuarta.** Para limpiar los fondos de los dientes de la cuarta maza se utiliza la cuchilla de cuarta maza que es similar en su función a la de los peines y además no permite que el bagazo se salga entre la cuarta maza y la maza cañera. Generalmente se construye de lamina de hierro negro.

## **1.2 Turbinas de vapor**

Las turbinas de vapor convierten la energía térmica (entalpía) disponible en el vapor, en energía mecánica. Se utilizan en los ingenios azucareros a partir de 1947 cuando empezaron a sustituir a los motores de vapor.

### **1.2.1 Tipos de turbinas utilizadas**

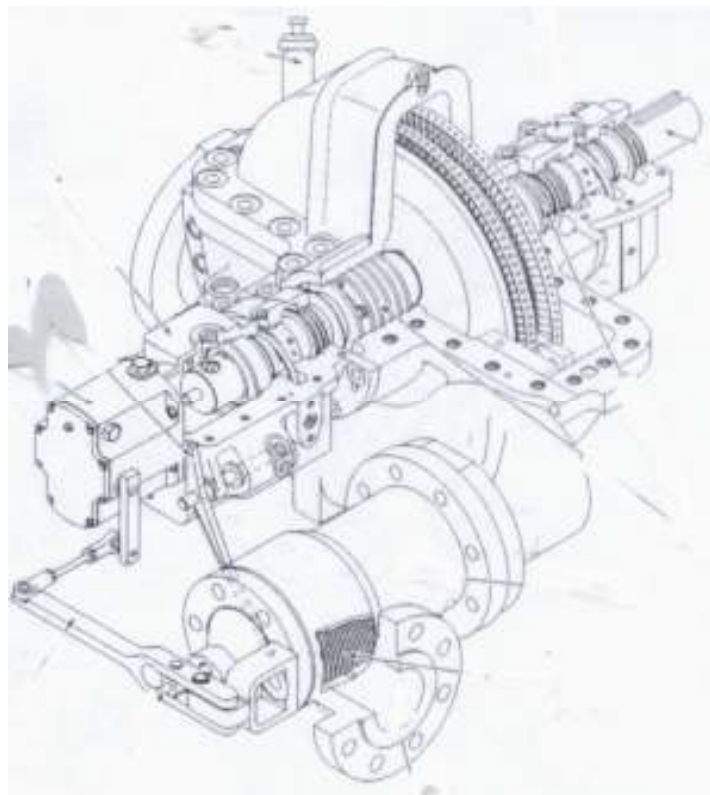
En el ingenio para mover los molinos se utilizan turbinas de contrapresión de una etapa, del tipo de impulsión (Curtís). El uso de este tipo de turbinas se debe a razones prácticas, por su diseño, que incluye entre otras características mayor robustez de los álabes, holguras amplias entre los elementos rotativos, empujes axiales mínimos, velocidades de operación bajas en su punto óptimo de operación y lo sencillez del rotor que es la principal parte móvil. El rotor de la turbina está compuesto por dos ruedas y el eje donde van montadas. Cada rueda lleva en su periferia una fila de alabes. Los alabes están ensamblados por un extremo con espiga de cola de milano a las ruedas. En el extremo exterior los alabes se aseguran entre ellos en grupos (segmentos) por medio de bandas de acero a las cuales se remachan. La razón de asegurar los alabes en segmentos es que, entre cada dos segmentos queda un espacio libre que permite la expansión y dilatación por temperatura.

En operación, el vapor entra a la turbina por la cámara de admisión de vapor a través de la válvula del gobernador y pasa hacia la válvula de disparo y llega al anillo de toberas estacionarias del primer diafragma fijo.

En ese anillo el vapor se expande y se dirige contra los alabes de la primera rueda. Fluyendo desde los alabes de la primera rueda, el vapor entra a los alabes fijos del anillo guía los cuales lo dirigen contra los alabes de la segunda rueda. El anillo guía es similar al de diafragma y está montado en la carcasa inferior de la turbina entre las dos ruedas. El vapor al salir de la segunda rueda se dirige a la sección de descarga o escape de la turbina. El vapor de salida (vapor de escape) con menos temperatura y presión se utiliza en los procesos siguientes de calentamiento y concentración del jugo de caña.

En la figura 18, se muestra una turbina tipo impulsión de una etapa y sus principales componentes.

**Figura 18. Turbina de vapor tipo impulsión**



Fuente: Catalogo **Dresser Rand**, Turbines, p. 2.



### **1.2.2 Condiciones actuales de operación**

Las condiciones de operación de las turbinas por las variaciones de carga que se dan en los molinos, propician la irregularidad en la producción de vapor en las calderas y también por la heterogeneidad del combustible utilizado, las turbinas se especifican con equipos auxiliares que ayuden a optimizar su funcionamiento y la protejan. Entre los principales equipos que ayudan a optimizar se encuentran el gobernador o regulador de velocidad y las válvulas de toberas auxiliares. Los equipos auxiliares que ayudan a proteger la turbina son, entre otros, la válvula de emergencia, el regulador de disparo por sobre velocidad y el sistema de lubricación forzada. El gobernador o regulador de velocidad tiene la función de mantener constante la velocidad prefijada de la turbina. El gobernador está mecánicamente conectado a la válvula de regulación, admitiendo la cantidad de vapor adecuada a la demanda, y controla la velocidad del eje variando la apertura de la válvula proporcionalmente a las variaciones de carga. Las válvulas manuales de toberas trabajan sobre las toberas auxiliares y permiten conseguir el máximo rendimiento de la turbina cuando ésta trabaja con carga parcial o con carga nominal pero con la presión de vapor debajo de la necesaria y también cuando el molino esta trabajando sobrecargado.

La válvula de emergencia tiene la función de detener la turbina cuando se produce un exceso de velocidad. Esta válvula se puede accionar manualmente desenganchando la palanca de disparo o automáticamente respondiendo a una señal del sistema de lubricación (por baja presión de aceite) o al sistema de aire comprimido (baja presión de aire) o, al sistema eléctrico (disparo por solenoide) o disparo por contrapresión alta.

El regulador de disparo por sobre velocidad está situado en un alojamiento en el extremo del eje del lado de la entrada de vapor y tiene la función de detener la turbina cuando alcanza la velocidad prefijada de disparo. La velocidad de disparo viene especificada por el fabricante y solo se puede bajar o subir dentro de un pequeño rango.

El sistema de lubricación forzada consiste de una bomba de aceite con motor eléctrico, tubería y accesorios que está conectada al sistema de lubricación interno de la turbina. Este sistema arranca automáticamente cuando detecta que hay baja presión de aceite en el sistema interno de la turbina y restablece la presión. Cuando el sistema interno de la turbina alcanza el valor prefijado y la turbina lo mantiene, se desconecta automáticamente. En la tabla II, se muestran las condiciones de operación actuales de las turbinas en el ingenio.

**Tabla II. Condiciones actuales de operación**

Turbina	Potencia HP	Velocidad de operación RPM	Presión psig.	Presión psig.	Temperatura °F	Rotación	Velocidad de disparo	Válvulas manuales	
								abiertas	cerradas
1	1000	4300	200	20	438	CCW	4950	1	1
2	1000	4300	200	20	438	CCW	4950	1	1
3	700	3800	200	20	400	CCW	4400	1	1
4	750	4100	200	20	400	CCW	4400	1	1
5	750	4100	200	20	400	CCW	4600		1
6	700	4400	200	20	400	CW	4900	1	---

CCW = counterclockwise = sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj.

CW = clockwise = en el sentido de rotación de las agujas del reloj

### **1.3 Reductores de velocidad**

La mayoría de las turbinas de los molinos cañeros operan con velocidades entre 3600 y 5000 revoluciones por minuto (rpm) y esa velocidad se reduce para que los molinos operen con velocidades entre 3.5 y 8.5 rpm. Para lograr esas reducciones de velocidad se instala un tren de reductores de velocidad.

#### **1.3.1 Tipos de reductores utilizados**

Viendo de la turbina al molino, los reductores son conocidos como de alta velocidad, media velocidad 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.

En algunos casos sólo se utilizan el reductor de alta velocidad y otro reductor de múltiples ejes que transmite hasta el molino, este es el caso del último molino en el ingenio.

Para la primera reducción, la que recibe de la turbina, debido a que la velocidad del piñón del eje de entrada es muy alta, mayor de 3600 rpm (más de 5000 pies /minuto en el diámetro primitivo), se utilizan reductores de alta velocidad de ejes paralelos del tipo doble helicoidal de simple reducción. Estos reductores generalmente tienen los engranes integrados con el eje y operan con ratios de velocidad entre 1.50 y 7.50.

Los reductores de media velocidad son de ejes paralelos del tipo doble helicoidal de triple o cuádruple reducción y reciben entre 1200 y 2500 rpm provenientes del eje de salida del reductor de alta. Estos reductores operan con ratios de velocidad entre 20 y 86.5 y entregan de 5 a 40 rpm en la salida. Tanto los reductores de alta como de media velocidad por su tipo tienen la ventaja de operar con bajo nivel de ruido, potencias altas, ocupan relativamente poco espacio y el empuje axial es mínimo.

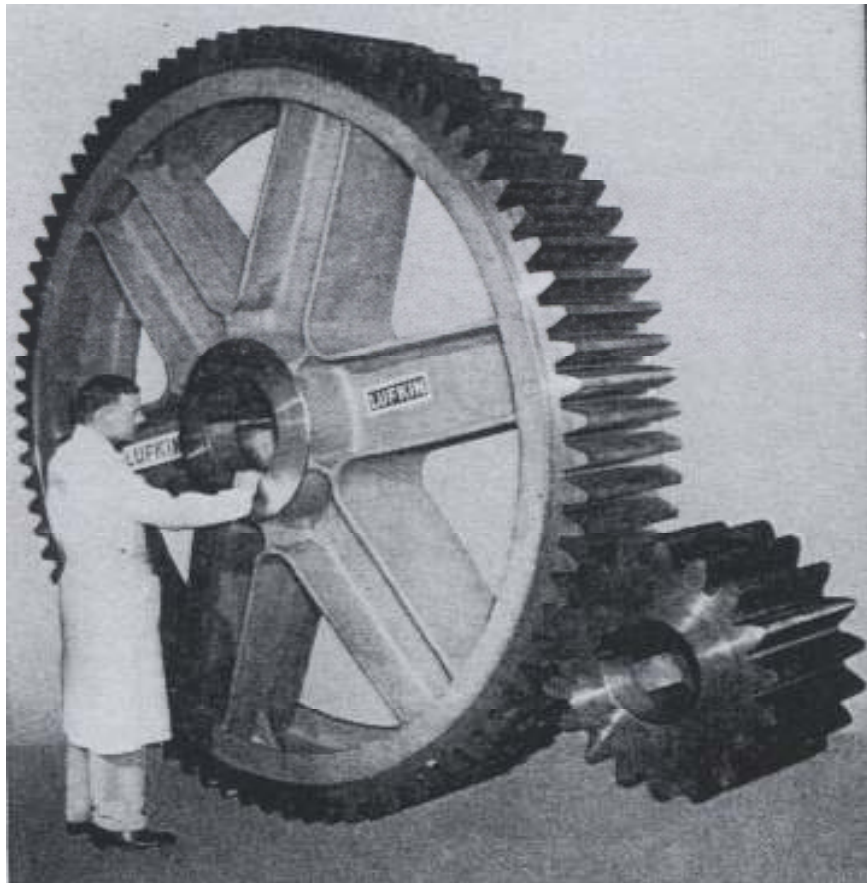
La última etapa de reducción regularmente es un conjunto de piñón y catarina. Esta reducción se caracteriza porque la relación del número de dientes de la catarina con respecto del piñón es muy alta. La catarina y el piñón tienen engranes del tipo de dientes rectos con perfil de involuta.

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 a mayor dureza que los dientes de la catarina. Esa mayor dureza se debe a que trabaja a una velocidad mayor que la catarina (da mucho más vueltas).

Las catarinas debido a sus grandes diámetros (son los engranes de mayor tamaño usados en los ingenios) son construidas tipo araña o estrella, su masa donde va el eje se une al aro exterior donde van los dientes por medio de brazos conectando masa y aro; otro tipo es el de placas, la masa se une al aro exterior por medio de dos placas de lámina. En la figura 19 se observa el tamaño de una catarina y un piñón.

Los engranes de dientes rectos tienen la ventaja de transmitir sin empuje ni desplazamiento axial, son silenciosos, transmiten grandes potencias y son económicos.

Figura 19. Tamaño de una catarina y piñón



Fuente: Revista **Sugar y Azúcar**, Year book 1968, p. 128.

### 1.3.2 Rangos de operación

En la tabla III, se muestran los rangos de operación de los reductores en el ingenio.

**Tabla III. Rangos de Operación de reductores**

	Velocidad (rpm)	Reductor de alta	Reductor intermedio	Reductor de baja
Molino 1	Entrada	3800 - 4300	1130 -- 1280	26.365 – 29.865
	Salida	1130 - 1280	26.365 – 29.865	6.165 -- 6.983
Molino 2	Entrada	3800 - 4300	1130 -- 1280	26.365 – 29.865
	Salida	1130 - 1280	26.365 – 29.865	6.165 - 6.983
Molino 3	Entrada	3300 - 3800	992 -- 1143	23.150 – 26.668
	Salida	992 - 1143	23.150 – 26.668	6.070 -- 7.00
Molino 4	Entrada	3800 - 4300	1143 -- 1293	26.668 – 30.168
	Salida	1143 - 1293	26.668 -- 30.168	6.237 -- 7.055
Molino 5	Entrada	4000 - 4400	1189 -- 1308	27.741 -- 30.518
	Salida	1189 - 1308	27.741 -- 30.518	6.488 -- 7.137
Molino 6	Entrada	4300 - 4500	No tiene	214.78 -- 224.775
	Salida	214.78 - 224.775	No tiene	5.865 -- 6.138

### 1.3.3 Acoplamiento de los reductores de baja velocidad al molino

Tanto en el extremo del eje de la catarina, del lado del molino, como el extremo del eje de la maza superior, del lado de la catarina, son de sección cuadrada.

La maza superior recibe el movimiento giratorio, proveniente de la catarina, por medio de una barra de acero de sección cuadrada que se conecta en sus extremos a los ejes de la catarina y la maza por medio de acoples. Esta barra de sección cuadrada se conoce como Barra de Acoplamiento o Entredos.

La longitud mínima de la barra de acoplamiento es igual a la suma de los largos de los dos acoples. El largo de la barra, que es menor que la distancia entre los extremos de los ejes de la catarina y el molino, permite montar o desmontar la barra y acoplar la transmisión a la maza sin tener que quitar o separar la catarina o la maza.

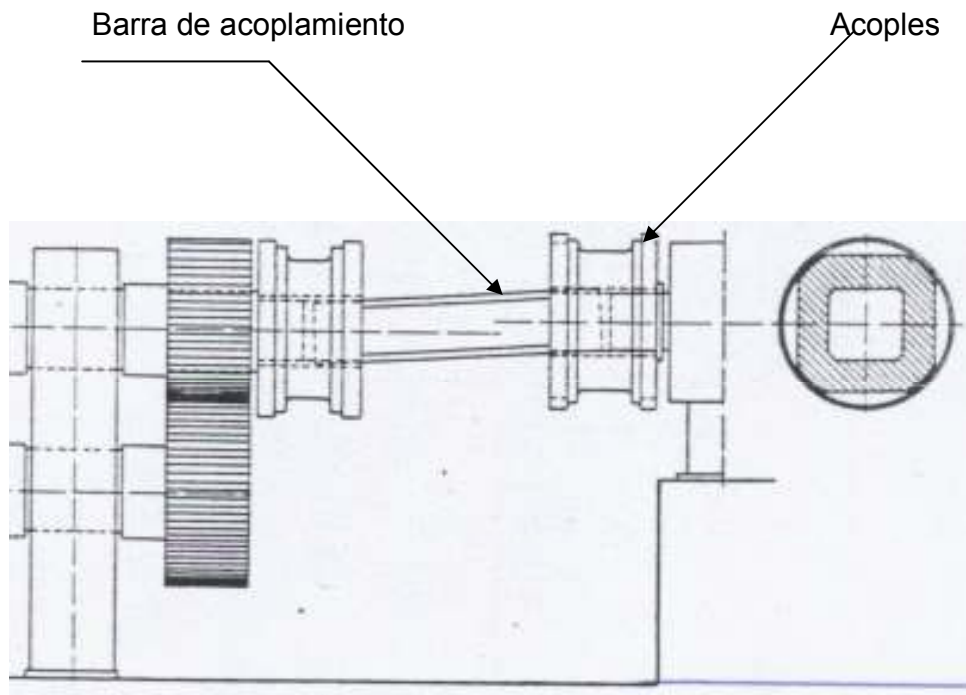
A pesar de que los acoples tienen suficiente holgura, entre  $3/8''$  y  $1/4''$  respecto de la barra de acoplamiento, que permite desajustes en la alineación, es preferible que la longitud de la barra sea mucho mayor que la suma del largo de los dos acoples. Lo anterior es lo ideal siempre que haya espacio.

Al alinear la catarina con la maza superior en el sentido vertical, se pone el centro del eje de la catarina mas alto que el centro del eje de la maza superior. Esa diferencia de altura entre centros de ejes permite que al flotar la maza superior, por efecto de la carga en el molino, la barra de acoplamiento se alinee horizontalmente y transmita el movimiento sin esfuerzos

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. Algunos fabricantes diseñan los acoples calculando que sean ellos los que se rompan, actuando como fusibles, al momento de una sobrecarga que haga flotar demasiado la maza superior.

En la figura 20, se muestran la barra de acoplamiento, los acoples y la forma en que se colocan en el molino.

**Figura 20. Posición de la barra de acoplamiento y acoples**



Fuente: **E. Hugot**, Handbook, p. 257.

|



## **2. TRANSMISIONES DE POTENCIA HIDROSTÁTICA.**

### **2.1 Componentes básicos de una transmisión hidrostática**

Los principales componentes de una transmisión hidrostática son: la unidad de potencia, motor hidráulico, los accesorios y el sistema de control.

#### **2.1.1 Unidad de potencia**

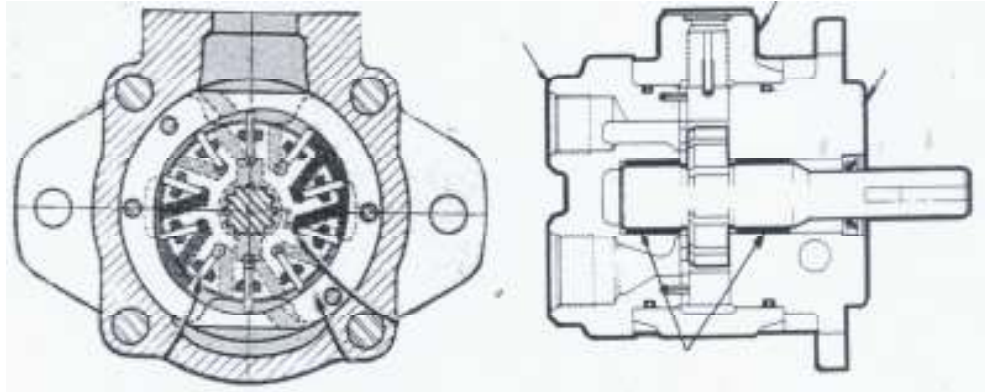
La unidad de potencia consiste de motor eléctrico, bomba hidráulica, tanque de aceite y accesorios de la unidad de potencia.

El motor eléctrico puede ser de cualquier tipo en cuanto a montaje, vertical u horizontal. En lo que respecta al diseño de la armazón o bastidor es preferible que sea del tipo de brida en el extremo donde sale el eje. Este diseño permite mantener la concentricidad y la distancia exacta entre el eje de la bomba hidráulica y el motor eléctrico lo cual es importante para mantener la eficiencia de ambos. Es deseable, aunque no imperativo, que sea totalmente cerrado y a prueba de fuego por la cercanía con el aceite en caso se presentara alguna fuga. La velocidad recomendada para transmisiones hidráulicas es de 1750 revoluciones por minuto.

Las bombas hidráulicas que se usan en los sistemas hidráulicos en general son del tipo de desplazamiento positivo. Por su diseño pueden ser de paletas, tornillo, engranes o pistones. De acuerdo al requerimiento del sistema hidráulico donde se van a usar, pueden ser de descarga fija o variable.

No importando el diseño ni el requerimiento del sistema donde se usen, la función de las bombas hidráulicas es, convertir la energía mecánica proveniente de un motor eléctrico o de otro tipo, en energía hidráulica de trabajo, que es, una combinación de energía cinética y presión. Para que un sistema hidráulico sea llamado apropiadamente transmisión hidrostática, la bomba o el motor o ambos deben ser de descarga variable. Por sus características propias las bombas de paletas y las de pistones son las más eficientes con descarga variable. El diseño básico de las bombas de paletas consiste de una carcasa o cuerpo donde están montados los componentes básicos que son, el eje rotor, paletas, anillo o pista, y dos discos con agujeros especiales (en forma de riñón) que sirven como puertos de entrada y salida del fluido. El eje rotor que recibe el movimiento giratorio está montado descentrado respecto de la carcasa y del anillo o pista interior. Las paletas al girar el eje rotor, son lanzadas hacia afuera por la fuerza centrífuga y hacen contacto con el anillo interior formando un sello positivo. En el lado de succión es donde se genera el mayor volumen entre las paletas y el anillo logrando así llenar de fluido la succión de la bomba. Hacia el lado de salida de la bomba el volumen entre las paletas y el anillo va disminuyendo hasta ser mínimo en el lado de descarga. La presión en ese punto es la máxima y así la entrega al sistema. En la figura 21, se muestra una bomba hidráulica de paletas.

**Figura 21. Bomba de paletas.**



Fuente: Catálogo **Parker, Fluid Power Components**, 1976 Edition, p. 786.

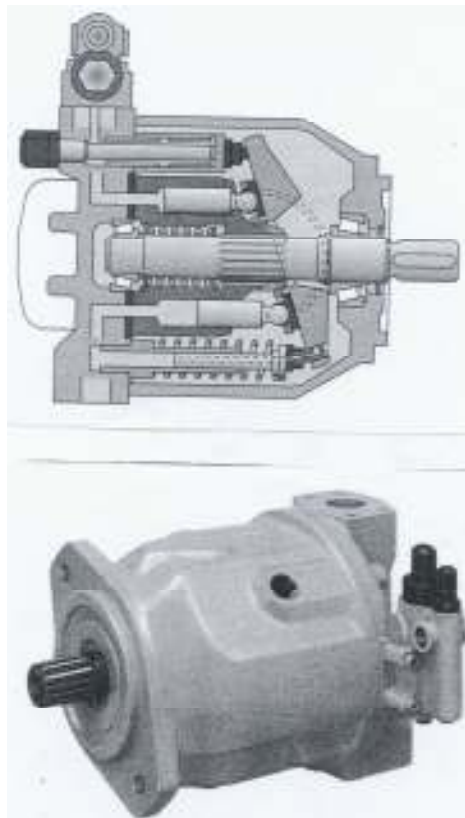
Las bombas de pistones de descarga variable básicamente están compuestas de un tambor de cilindros, émbolos con zapatas a rótula, placa de lumbreras, placa de deslizamiento ajustable, placa de zapatas y resortes de compensación. Los émbolos van montados y se mueven en los agujeros del tambor de cilindros y el tambor de cilindros va ensamblado en su diámetro interior al eje motriz puede hacerse la comparación de que el tambor de cilindros es como el tambor de un revolver y los cilindros son los huecos donde van las balas.

El funcionamiento de la bomba se inicia cuando el eje junto con el tambor de cilindros gira movido por el motor eléctrico y los émbolos son forzados por los resortes a hacer contacto con la superficie de la placa deslizante. Ese contacto origina un movimiento recíprocante de los émbolos dentro de los agujeros del tambor de cilindros. En la primera mitad de la rotación los cilindros se desplazan hacia fuera del tambor de cilindros generando un aumento de volumen dentro de los agujeros y el fluido llena ese espacio a través de la lumbrera de entrada.

En la otra mitad de la rotación los émbolos se desplazan hacia adentro generando una disminución de volumen y aumento de presión y el fluido es empujado a través de la lumbrera de salida, a alta presión, hacia el sistema.

En cada revolución la cantidad de fluido entregado al sistema está definido por el área de la sección circular del émbolo y la distancia recorrida por el émbolo. Lo anterior significa que entre mayor sea el ángulo de inclinación de la placa deslizante, mayor volumen de fluido descarga la bomba ya que los émbolos recorren mayor distancia. En la figura 22, se muestra una bomba de pistones.

**Figura 22 Bomba de Pistones**

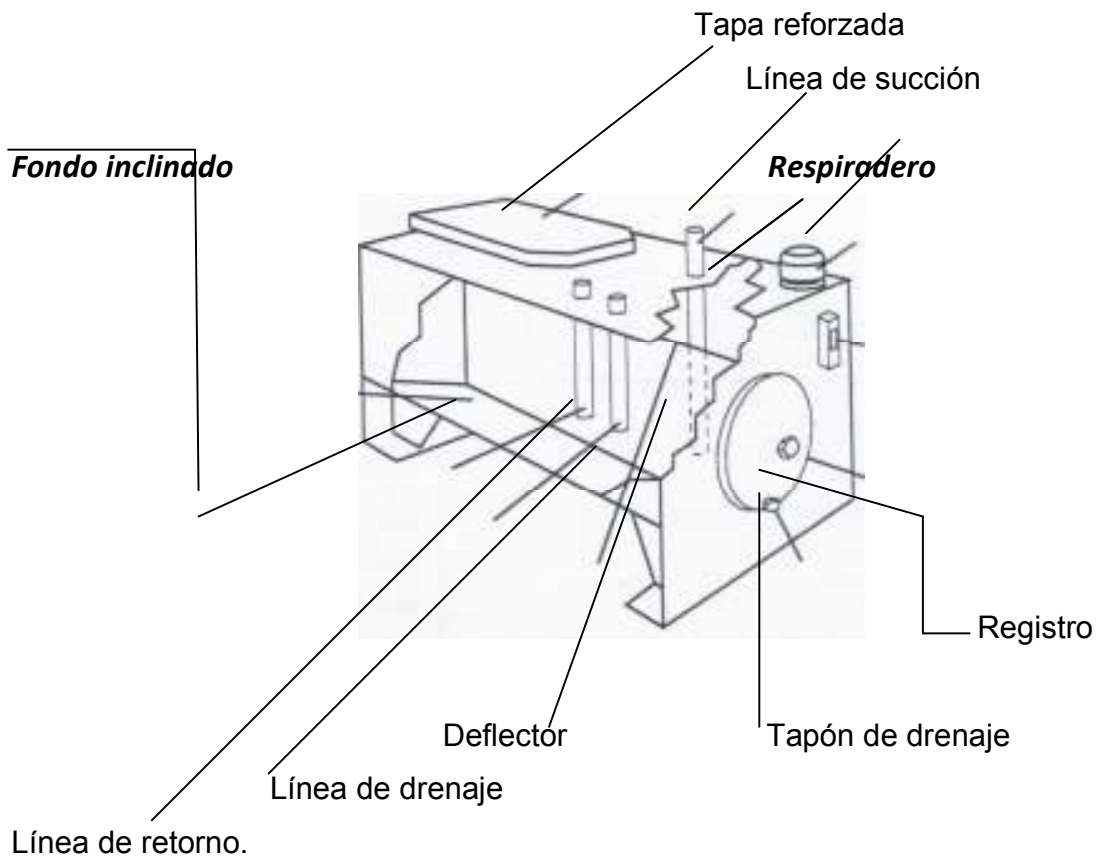


Catálogo **Mannesmann Rexroth**, Pump and Motor Vol. 2 , 1998, p. 305-1

**Los principales accesorios** de la unidad de potencia son: el tanque de aceite, los filtros y el intercambiador de calor.

**Tanque de aceite.** El diseño y tamaño del tanque de aceite de una transmisión hidrostática es de vital importancia para su funcionamiento adecuado. Un tanque bien diseñado además de contener el aceite también sirve para enfriarlo, permite que las materias extrañas contaminantes se asienten, ayuda al enfriamiento y facilita la salida del aire arrastrado en el aceite. El diseño debe considerar paredes fuertes, fondo cóncavo y tapa superior reforzada que permita montar equipos. Se recomienda que tenga patas que lo separen del suelo (por lo menos tres pulgadas), entradas para las líneas de succión y retorno, agujero con tapón para drenaje, nivel de aceite, agujero que sirva para llenarlo y de respirador a la vez y placa interior de desviación. La boca de la línea de succión debe colocarse cerca del fondo del tanque con filtro en la entrada para aprovechar la separación por gravedad de las partículas contaminantes. La línea de retorno debe ponerse de modo que el flujo se descargue por debajo del nivel de aceite en el tanque. La placa de desviación divide el tanque en dos secciones de modo que el aceite que retorna llegue a la sección de retorno, pase al lado de la succión sin turbulencia, permita asentar la suciedad, permita que el aire se eleve hasta la superficie y que el calor del aceite se disipe a través de las paredes. En lo que respecta al tamaño del tanque, se recomienda que su capacidad, en galones, sea 0.625 veces del flujo total de la bomba a carga máxima. Cuando exista limitación en espacio la capacidad mínima debiera ser 0.500 de flujo total de la bomba. En la figura 23, se muestra un diseño de tanque de aceite y sus partes principales.

**Figura 23. Tanque de aceite**



Fuente: **Parker Industrial Hydraulic Technology**, Bulletin 0232-B1, página 15-1.

**Filtros.** La función de un filtro en un sistema hidráulico es remover la suciedad del fluido hidráulico. Esto lo hace forzando la corriente del fluido a pasar a través de un elemento filtrante el cual atrapa la suciedad. Los filtros en un sistema hidráulico son indispensables pues en gran medida de ellos depende el tiempo de vida del equipo. La especificación de un filtro para un sistema hidráulico debe hacerse en base a su capacidad nominal o absoluta y el grado de filtración.

La capacidad nominal de un filtro se basa en el tamaño promedio de los poros o agujeros del elemento filtrante, y la capacidad absoluta da el tamaño del poro o agujero más grande que existe en el elemento filtrante. Así por ejemplo, en un elemento filtrante con una capacidad nominal de 40 micrones, se entiende que el tamaño promedio de los poros es por lo menos 40 micrones y que inicialmente quitará la mayor parte de las partículas de 40 micrones y más pequeñas y no quitará alguna suciedad que sea más grande que 40 micrones. Para el mismo ejemplo, si el filtro fuera clasificado de acuerdo a su capacidad absoluta, no debiera dejar pasar partículas mayores de 40 micrones. Debido a que la capacidad absoluta se refiere al diámetro de la partícula dura y esférica más grande que pueda pasar a través del elemento y a que las partículas en el fluido viajan en chorro a alta presión y alta velocidad y tienen cualquier forma, especificado así tampoco garantiza que no pasen. Debido a lo anterior, las capacidades absoluta o nominal no garantizan que tamaño de partículas atraparan o que tan limpio saldrá el fluido.

El grado de filtración se define como el número de partículas presentes en el aceite antes de filtrar en relación al número de partículas después de filtrar. Por ejemplo, si un filtro tiene un grado de filtración  $\beta_{10}=75$  quiere decir que antes de la filtración el aceite contiene un número  $N$  de partículas mayores o iguales a 10 micrones y después de pasar por el filtro, una vez, el contenido es de  $N/75$  partículas mayores o iguales a 10 micrones. Esto significa que se han filtrado,  $N - N/75 = 74N/75$  partículas mayores o iguales a 10 micrones. En cuanto a capacidad de volumen a manejar, en general, el tamaño de un filtro para un sistema hidráulico debe escogerse por lo menos, para manejar dos veces el flujo nominal del sistema.

**Intercambiadores de calor.** En todo circuito hidráulico hay una parte de la potencia empleada que por la ineficiencia se manifiesta en forma de calor.

En el tanque de aceite se espera que se disipe el calor, pero no siempre es así, por lo cual deben usar intercambiadores de calor. Existen dos tipos de intercambiadores, de aire y de agua.

En los de aire el fluido pasa a través de unos tubos o placas a las cuales van sujetas aletas. Para disipar el calor se sopla aire sobre los tubos y sus aletas por medio de un ventilador. La operación es muy similar a la de un radiador de calor. Los intercambiadores de calor de aire se usan cuando el agua es difícil de conseguir o es muy cara.

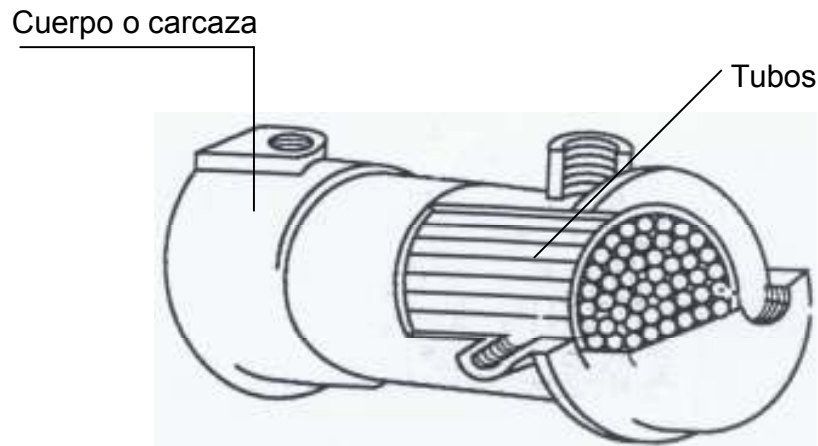
Los intercambiadores de calor de agua consisten de un tubo grande que actúa como cuerpo o carcasa de un grupo de tubos pequeños encerrados paralelamente. En este tipo de enfriador el fluido pasa por afuera de los tubos pequeños y el agua adentro de ellos, son conocidos como de concha y tubo.

Los dos tipos pueden trabajar con aire o agua caliente u utilizarse como calentadores en lugares de clima frío. La carcasa es diseñada por la mayoría de fabricantes para operar entre 250 y 300 psig y los tubos entre 125 y 150 psig. Por lo anterior se colocan en zonas de baja presión del circuito o en un circuito separado. En la mayoría de aplicaciones es recomendable instalarlos en la línea de retorno.

Para cualquier circuito hidráulico los intercambiadores debieran tener una capacidad de enfriamiento alrededor del 15 al 20 % de la potencia instalada. En la práctica puede usarse la relación de un galón de agua por cada dos galones de aceite. En la figura 24, se muestra un intercambiador de calor de concha y tubo.



**Figura 24. Intercambiador de calor**



Fuente: **Parker Industrial Hydraulic Technology**, Bulletin 0232-B1, p. 15-2.

### **2.1.2 Motor hidráulico**

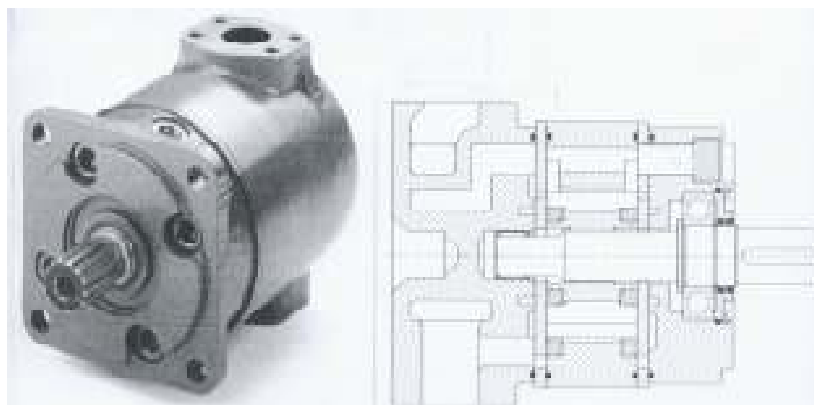
Los motores hidráulicos son aparatos del tipo de desplazamiento positivo. En los circuitos hidráulicos existen tres diseños básicos, de paletas, de engranes y de pistones. Los de paletas y engranes se prefieren en aplicaciones de desplazamiento fijo o constante y el de pistones en desplazamiento variable como es el caso de las transmisiones hidrostáticas. En general, los motores hidráulicos transforman la energía hidráulica de trabajo, proveniente de una unidad de potencia, en energía mecánica giratoria. Esa energía se aplica por medio de un eje al equipo o carga a mover. En su construcción los motores hidráulicos son muy similares a las bombas hidráulicas.

Las diferencias más importantes entre un motor y una bomba se manifiestan en el paso del fluido dentro de ellos.

En las bombas el fluido, hasta en un noventa y ocho por ciento del flujo, si no existen restricciones, es descargado al sistema; en un motor debe haber una línea de drenaje exterior en la carcasa para evitar la contrapresión y proteger sus partes internas y en la línea de drenaje puede desviarse hasta un veinte por ciento del flujo. También, en una bomba lo principal es lograr la cantidad y velocidad de flujo de fluido mientras que en el motor lo importante es desarrollar el torque y velocidad necesarios. Los motores se diseñan para operar en ambas direcciones (bidireccionales) y los que operan en una sola dirección (unidireccionales) son probablemente motores bidireccionales en su diseño original. Los motores siempre que reciban un flujo constante mantendrán su velocidad relativamente constante sin tener en cuenta la presión. Lo anterior se refiere a que la velocidad a la cual gire el eje del motor es determinada por que tan rápidamente es llenado con fluido. En la figura 25, se muestran motores hidráulicos de paletas, engranes y pistones.

**Figura 25. Motores Hidráulicos de paletas, engranes y pistones**

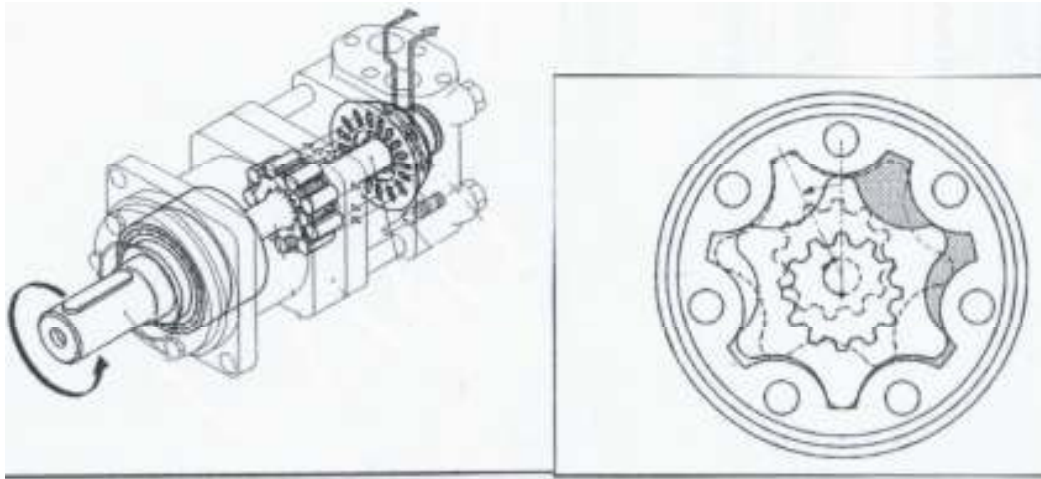
Motor Hidráulico de Paletas.



Fuente: Catalogo **Riiner Hydraulics**, Data sheet 01- 50001/ 1998, p. 1

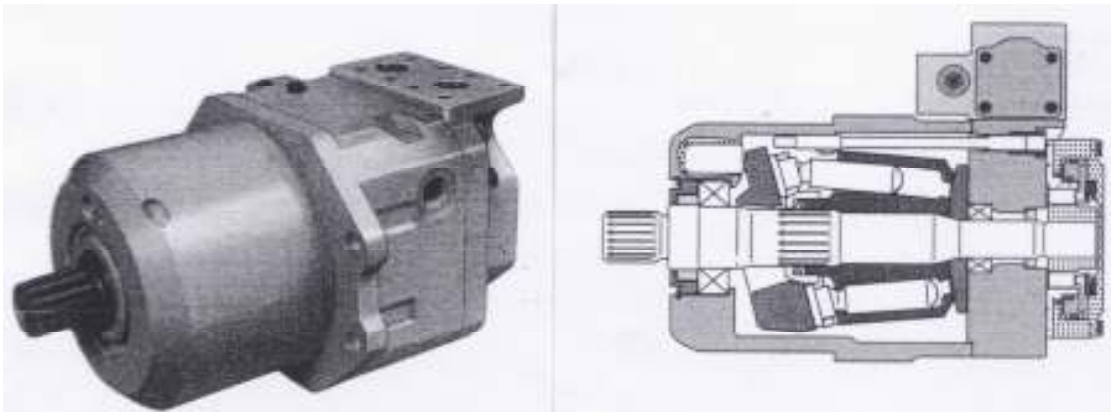
*continuación*

### Motor Hidráulico de Engranés.



Fuente: Catálogo **Danfoss Hydraulics**, Book 0 Partition 4, p. 4

### Motor Hidráulico de pistones



Fuente: Catálogo **Mannesmann Rexroth, Pump and Motor** volume 2 1998, p. 909

Para todos los motores hidráulicos un objeto, carga o equipo acoplado a su eje genera un torque. Ese torque es una resistencia para el motor la cual debe vencerse por la presión hidráulica actuando sobre el conjunto giratorio, paletas, engranes o pistones del motor.

**Motores hidráulicos de paletas.** Los motores hidráulicos de paletas constan de paletas, eje rotor, anillo interno y placas de lumbreras con entradas y salida en forma de riñón. En estos motores un desbalance es causado por la diferencia la diferencia de área de la paleta expuesta a la presión hidráulica. Debido a que el rotor esta descentrado en la carcasa el área de las paletas expuesta a la presión aumenta hacia la parte de arriba de la carcasa y disminuye en la parte de abajo. Cuando el fluido presurizado entra por el puerto de entrada la desigualdad de las áreas de las paletas con respecto al lado de salida, da como resultado que se desarrolle un torque en el eje del motor.

Entre más grande sea el área expuesta de las paletas o entre más grande sea la presión proveniente de la unidad de potencia, más grande será el torque desarrollado en el eje. Si el torque desarrollado es lo suficientemente grande, el rotor y el eje girarán y moverán la carga aplicada. La diferencia entre la presión de entrada y la de salida resulta en cargas laterales (descompensadas) las cuales pueden ocasionar daños severos en el lado de alta presión. Para evitar esos daños el contorno del anillo exterior se cambia de circular a uno circular con su interior en forma de levas. Con el anillo de levas las fuerzas actuando sobre el eje se balancean y la carga lateral sobre el eje se elimina. El cambio mencionado da como resultado un motor hidráulico de paletas balanceado. En las transmisiones hidrostáticas se usan solo motores balanceados.

**Motores hidráulicos de engranes.** Los motores hidráulicos de engranes constan de una carcasa con puertos de entrada y salida y un conjunto giratorio compuesto de dos engranes montados cada uno en su eje y que trabajan juntos. Uno de los engranes es el motriz o impulsor que se acopla a un eje al cual se le pone la carga a mover y el otro engrane es el impulsado. En estos motores el desbalance es causado por el desengrane o desencajamiento de los dientes de un engrane respecto del otro. Cuando están en operación la entrada esta sujeta a la presión alta del sistema y la salida está bajo la presión del tanque. Cuando un diente no engrana todos los dientes sujetos a la presión del sistema están hidráulicamente balanceados excepto por un lado de ese diente. Debido a lo anterior el torque desarrollado por un motor de engranes es una función de un lado de un diente. Entre más grande sea el diente del engrane o más grande sea la presión mayor será el torque producido.

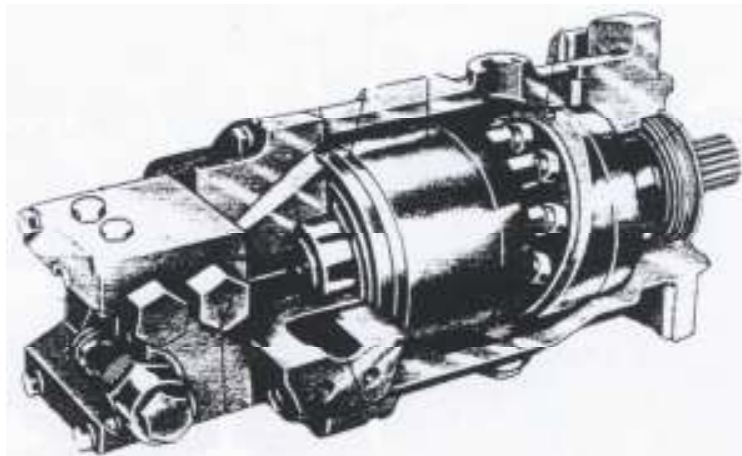
**Motores hidráulicos de pistones.** Existen dos tipos básicos de motores hidráulicos de pistones, de pistones de desplazamiento axial y pistones de desplazamiento radial.

Los motores hidráulicos de pistones axiales constan de un cilindro o cámara de pistones, placa deslizante, pistones con zapatillas a rótula, resortes de compensación, placas de lumbreras y eje. Los pistones van ajustados y distribuidos circularmente en los cilindros de la cámara de pistones. La parte de los cilindros que queda fuera de la cámara de pistones son las zapatillas a rótula. La placa deslizante que puede ser fija u oscilante está situada enfrente de la cámara de pistones de modo que al salir los pistones las zapatillas llegan a hacer contacto con la placa y por el movimiento giratorio de la cámara, se origina un recorrido circular deslizando sobre la placa.

En operación, con la placa deslizante puesta a un ángulo definido, las zapatillas no tienen una superficie perpendicular estable en la cual se apoyen por sí mismas. Cuando la presión del fluido actúa sobre el otro extremo del pistón se desarrolla una fuerza la cual empuja el pistón hacia fuera del cilindro y obliga a las zapatillas a deslizarse a través de la superficie de la placa deslizante. Conforme la zapatilla se desliza desarrolla un torque en el eje. La cantidad de torque desarrollado depende del ángulo de inclinación de la placa deslizante y la presión del sistema. Si el motor tuviera un solo pistón desarrollaría torque solamente en la mitad del círculo de rotación de la cámara de pistones o sea, donde la placa deslizante está más retirada.

En la práctica, la cámara de pistones contiene muchos pistones que permiten al eje del motor seguir girando y obtener el máximo torque constantemente. En la figura 26 se observa un motor hidráulico de pistones axiales.

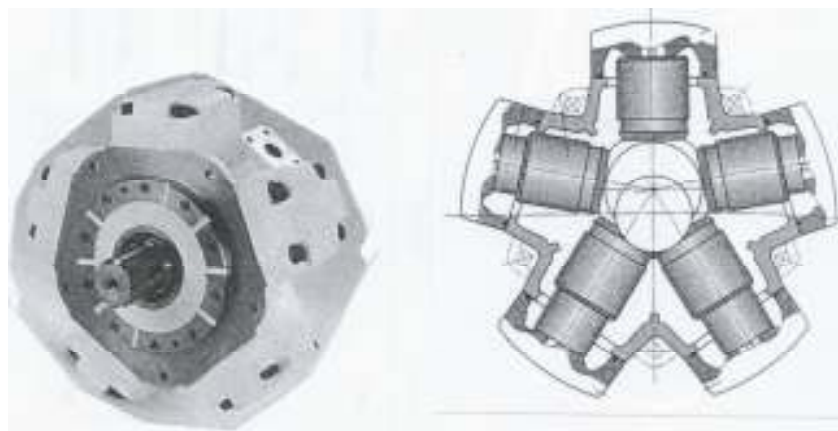
**Figura 26 Motor hidráulico de pistones axiales**



Fuente: Catálogo **Sauer-Sundstrand Company, Heavy Duty Transmissions**  
revised 1976, p. 4

**Los motores hidráulicos de pistones radiales** pueden ser de bloque de cilindros o de anillo de levas. Los de bloque de cilindros constan de una carcaza fija, eje de levas, cámara de cilindros dispuestos circular y radialmente al eje, pistones y culatas de los cilindros. La construcción de la carcaza que contiene las cámaras de los cilindros se pueden comparar con el bloque del motor de un automóvil pero, en vez de tener los cilindros en línea, los tiene dispuestos de forma circular, pentagonal u octogonal con los pistones actuando radialmente al eje. En su funcionamiento lo principal es transmitir la fuerza del eje de levas por medio de una columna de fluido presurizado. El fluido presurizado fluye a través de lumbreras axiales en el eje. La excéntrica del eje de levas tiene regularmente dos caras planas opuestas con dos lumbreras que dirigen el fluido por medio de un agujero en el centro de cada pistón, hasta dentro de la cámara comprendida entre el pistón y la culata. El pistón básicamente sirve para confinar el fluido. El fluido a alta presión produce una fuerza sobre el brazo de palanca de la excéntrica y hace girar el eje. La fuerza no es transmitida por el pistón sino por el fluido a alta presión actuando sobre la excéntrica del eje de levas. En la figura 27, se ve un motor de bloque de cilindros.

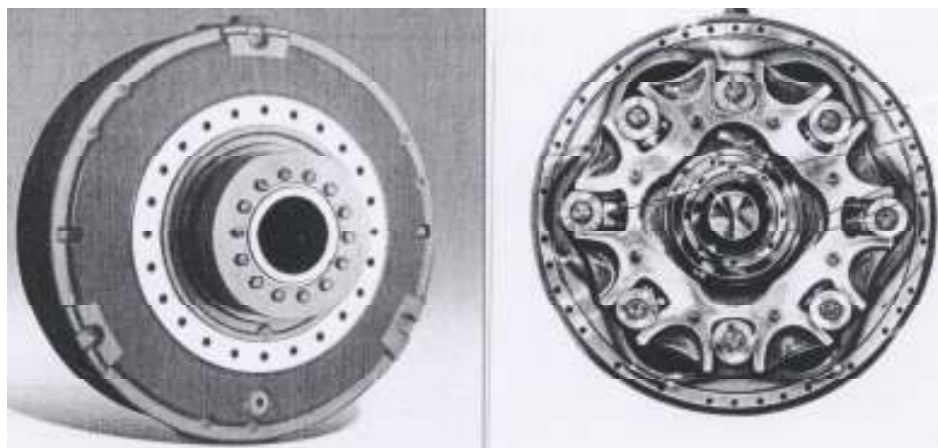
**Figura 27 Motor hidráulico de bloque de cilindros radiales**



Fuente: Catálogo **Mannesmann Rexroth** Volume 2, 1998 Edition, p. 750.

**Los motores hidráulicos de anillos de levas** constan de una carcaza fija, eje, bloque de cilindros circular, rodamientos guía, pistones rodillos de leva, placa de válvulas discos de levas y placa guía. El bloque de cilindros va montado en la carcaza sobre cojinetes de rodillos que son los que transmiten el movimiento giratorio al eje. Los pistones se disponen generalmente en números pares y están situados radialmente al bloque de cilindros y la placa de válvulas distribuye y dirige el fluido dentro y fuera de los pistones. Cada pistón actúa sobre un rodillo de leva situado en su extremo más alejado del eje. En operación, cuando el fluido a alta presión actúa sobre los pistones, los rodillos de leva son empujados contra el anillo de levas que está conectado rígidamente a la carcaza y así produce el torque en el eje. La fuerza de reacción pasa por medio de los rodamientos guía, que están en los mismos ejes de los rodillos de leva, a las dos placas guía que están unidas al bloque de cilindros del eje haciéndolo girar y desarrollar un torque proporcional a la presión del sistema. En este trabajo la transmisión propuesta utiliza este tipo de motor hidráulico. La figura 28 muestra diferentes vistas de un motor hidráulico de este tipo.

**Figura 28. Motor hidráulico de anillos de levas**



**Fuente:** Catalogo **Hagglunds Drive Product Manual Maratón EN 395**, p. 5.



### 2.1.3 Accesorios

Existe un sinnúmero de accesorios que se pueden usar en el circuito de una transmisión hidrostática cuya función es proporcionar seguridad, eficiencia y control de la operación. La cantidad de accesorios en cada circuito depende del grado de complejidad de cada instalación. Entre los accesorios utilizados hay algunos que son básicos y que no debieran faltar, entre otros, se pueden mencionar las válvulas, tuberías, mangueras manómetros, termómetros.

**Las válvulas** son aparatos mecánicos que constan de un cuerpo y una o varias partes internas móviles las cuales conectan o desconectan pasajes dentro del cuerpo. Dentro de los pasajes circula el fluido y las partes móviles controlan la presión, la dirección y tasa de flujo. Los tipos de válvulas más usadas y su forma de trabajo se mencionan a continuación.

- Válvulas de cheque o retención: dejan pasar el fluido en una sola dirección
- Válvulas de aguja: permiten regulaciones finas del flujo
- Válvulas de globo: permiten regulaciones gruesas de flujo
- Válvulas de compuerta : se usan totalmente abiertas o totalmente cerradas para cerrar o abrir el paso de todo el flujo
- Válvulas de bola : se usan en aquellas partes del circuito donde es necesario cerrar o abrir rápidamente el paso del fluido
- Válvulas direccionales : sirven para conectar y dirigir en su interior, la dirección del fluido en el sistema
- Válvulas de control de flujo : reducen o aumentan la tasa de flujo en el sistema, regularmente accionadas por un actuador externo.

En un circuito hidráulico todas las válvulas, independientemente de su tipo y función deben especificarse para soportar una presión mínima de 1.50 veces la presión máxima de operación en el sistema.

A estas válvulas por sus características especiales se les conoce como válvulas de alta presión hidráulica.

**Tuberías.** Cuando se habla de tuberías en un circuito hidráulico se entiende que son los tubos de acero diseñados para ese fin y que sirven para conducir el fluido en el circuito.

*La tubería para un sistema hidráulico debe ser especificada para ese uso, ya que debe soportar altas presiones y expansiones. También debe permitir el ensamble de accesorios hidráulicos como, conectores, tees, uniones, etc, especiales para alta presión. Regularmente se usan tubos especificados bajo los códigos , ASTM 4130 o ASME B31, tubos de líneas de alta presión. Las consideraciones básicas a tomar en cuenta para el diseño de las tuberías en un circuito contemplan que deben ser lo más rectas y cortas posibles para minimizar las pérdidas de presión, esto es, los equipos a conectarse debieran estar lo más cerca posible uno del otro para lograr poco volumen de compresión en el circuito debido a las variaciones de carga que son grandes y rápidas. También, así se evitan pérdidas de potencia y los costos de instalación se minimizan. Es recomendable que en el circuito hidráulico las perdidas de carga en las tuberías de alta presión y de retorno no excedan el 5% de la presión normal de trabajo y que, las velocidades del fluido no excedan los 5 metros / segundo en las tuberías principales y 1 metros / segundo en las tuberías de drenaje. La conexión directa a cada equipo debiera hacerse con mangueras conectadas a los tubos para evitar que las expansiones y/o vibraciones de los tubos lleguen al equipo y lo dañen.*

**Mangueras.** Las mangueras son necesarias en el circuito, ya que ocurren vibraciones choques y expansiones por la presión y temperatura del fluido. Las mangueras a utilizarse deben especificarse como mangueras hidráulicas; definiendo la presión de trabajo del sistema, la temperatura máxima y las características químicas del fluido a conducir. En lo que respecta a la presión, la manguera debe soportar como mínimo la presión máxima del sistema. En cuanto a la temperatura y tipo de fluido debe soportar la máxima temperatura esperada y su material debe ser químicamente compatible con el fluido

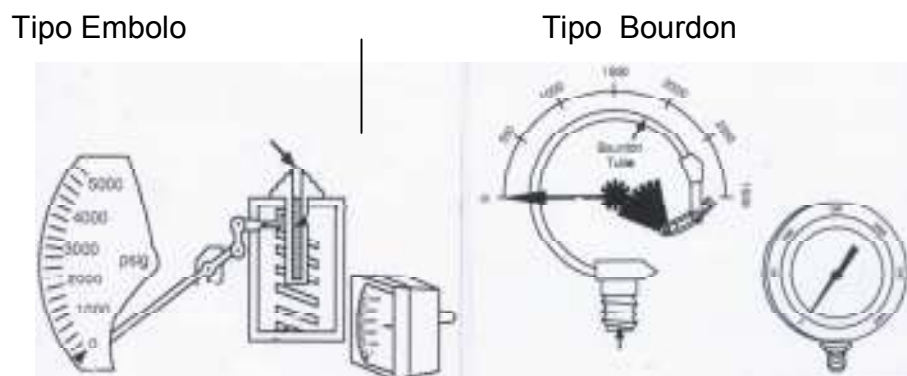
hidráulico para no degradarse ni contaminarlo. El tamaño de las mangueras es referido a su diámetro interior y debe ser tan pequeño como sea posible para obtener un volumen de compresión pequeño. Un tamaño de manguera debajo del mínimo da como resultado excesiva turbulencia del fluido, pérdida de presión alta y alta generación de temperatura. Por características de montaje las mangueras no deben doblarse más allá del radio de flexión recomendado por el fabricante y deben aceptar la conexión de conectores estandarizados para alta presión de acuerdo a las normas NFPA, ASTM, ISO y SAE para conexiones hidráulicas de alta presión.

**Manómetros y termómetros.** Los manómetros son aparatos que miden la intensidad de una fuerza aplicada a un líquido. En un circuito hidráulico ayudan a evaluar el rendimiento, ajustar presiones y descubrir problemas en el equipo. También son útiles para ajustar las válvulas de control de presión y para determinar el torque de un motor hidráulico. Existen dos tipos básicos de manómetros, los de tubo Bourdon y los de émbolo y pueden ser secos o llenos de líquido. En los circuitos hidráulicos se recomienda usar el de tipo Bourdon lleno de líquido. El tipo de líquido recomendado es la glicerina, ya que tiene buenas características de amortiguamiento para amortiguar el mecanismo del tubo Bourdon, amplifica la escala de lectura y le prolonga la vida al manómetro.

Los manómetros deben tener un grado aceptable de exactitud. La exactitud en un manómetro se refiere a un porcentaje del intervalo cubierto por la escala o a un porcentaje de la lectura indicada. Los más usados son de intervalo cubierto. Solo en los casos de manómetros patrón o de precisión se definen por el porcentaje de la lectura indicada. Existe una escala de exactitud general para los manómetros y en los manómetros hidráulicos el grado de exactitud recomendado es el Grado A1 que está calibrado con una exactitud de  $\pm 1\%$  en todo el rango del manómetro. Las escalas de exactitud están bajo las normas ASME B40.1. En los puntos del circuito donde no se necesitan

lecturas muy exactas, porque la medición de la presión no es crítica, pueden usarse manómetros Grado B de  $\pm 2, - 3, - 2 \%$ . – este tipo regularmente esta bajo la norma ASME B40.3. En la figura 29 se muestran manómetros de los dos tipos.

**Figura 29. Tipos de manómetros**



Fuente: Catálogo **Parker Industrial Hydraulic Technology** Bulletin 0232-B31, p. 15 – 23.

Los termómetros son aparatos que miden la diferencia de temperatura de un cuerpo con respecto a un valor de referencia.

En un circuito hidráulico permiten visualizar la temperatura del fluido dentro de la bomba, el motor o el tanque.

La temperatura normal de operación continua de un circuito hidráulico a lo largo del día en nuestro medio debiera variar desde 80 °F por la mañana hasta 140 °F al medio día. En el lugar más caliente del circuito, que regularmente es el tanque, la temperatura máxima debiera estar alrededor de los 195 °F. Durante la operación pueden aceptarse aumentos de temperatura hasta 200 °F pero intermitentemente en intervalos no mayores

de cinco minutos. Los termómetros se sugiere que tengan una escala de medición amplia (aproximadamente el doble) de modo que la temperatura normal de operación se registre cercana a la mitad de la escala.

En los circuitos hidráulicos también se pueden usar los *switches* de temperatura y los sensores de presión los cuales actúan de acuerdo a un valor prefijado para maximizar la eficiencia del circuito y proteger los equipos de presiones y temperaturas extremas. Estos aparatos usualmente se montan para que operen de modo remoto.

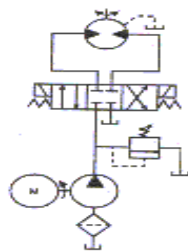
## **2.2 Principios básicos de operación**

El principio de operación de una transmisión hidrostática está basado en la conversión de energía en un circuito hidráulico por medio de una bomba conectada por líneas hidráulicas a un motor hidráulico. La transmisión se diseña de modo que optimice la relación directa que existe entre presión, velocidad y flujo de fluido.

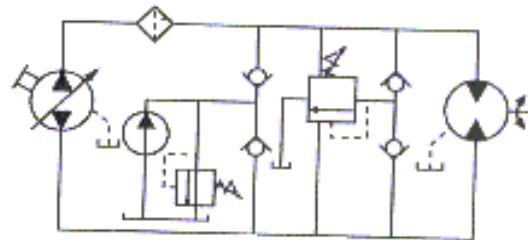
En funcionamiento, la energía mecánica proveniente de un motor, generalmente eléctrico, se utiliza para hacer girar una bomba hidráulica. La bomba hidráulica convierte esa energía mecánica en energía hidráulica, presión y flujo, la amplía e impulsa el fluido presurizado a través de tuberías y válvulas hacia el motor hidráulico. El motor hidráulico convierte la energía hidráulica en energía mecánica, velocidad y torque, para hacer girar su eje el cual moverá la carga aplicada. Debido a que la energía hidráulica debe estar dirigida y bajo control todo el tiempo, se diseñan circuitos hidráulicos que optimicen la transmisión. Esos circuitos pueden ser abiertos o cerrados. En un circuito abierto el fluido a alta presión de la salida de la bomba, está conectado a la

entrada del motor y la salida del motor, a menor presión, está conectada al tanque. El tanque, en este tipo de circuito generalmente es de un tamaño considerable. Para hacer girar el motor en una u otra dirección o para detenerlo se usa una válvula direccional. En un circuito cerrado la salida de la bomba, a alta presión, está conectada a la entrada del motor y la salida del motor, a más baja presión, está conectada a la entrada de la bomba. Cualquier fuga o pérdida de fluido en el circuito se compensa por medio de una bomba de relleno. En este tipo de circuito, el tanque que se usa es mucho más pequeño ya que la mayor parte del fluido está contenido y circulando en las tuberías. En la figura 30, se muestran en diagramas hidráulicos los dos tipos de circuitos.

**Figura 30. Circuitos Hidráulicos abierto y cerrado**



abierto



cerrado.

En ambos tipos de circuitos la velocidad del motor depende de su desplazamiento y de la tasa de flujo de la bomba y el torque depende de la presión y del desplazamiento del motor.

Por lo anterior es importante definir las variables presión, velocidad, flujo y torque ya que éstas, interrelacionadas determinan el tamaño y la potencia de la transmisión hidrostática.

### **2.2.1 Presión, velocidad y flujo**

Presión. Al seleccionar una transmisión hidrostática la presión de operación o de trabajo es la variable más importante a considerar, ya que esta refleja en gran medida el costo de la transmisión. La presión de trabajo es la presión a que estará trabajando la transmisión la mayor parte del tiempo. Para escoger la presión de trabajo se presentan alternativas que van desde baja presión de 500 a 1200 psig ; alta presión de 2000 a 5000 psig. Y muy alta presión, arriba de 5000 psig. Para cada aplicación existen diferentes factores a considerar al escoger entre las alternativa. En una transmisión de baja presión el costo inicial es muy alto, ya que debido a los altos volúmenes a desplazar se requiere de bombas, líneas de tuberías, válvulas y motores muy grandes para hacer el mismo trabajo, de una de mayor presión.

En las transmisiones de muy alta presión, el costo inicial también es muy elevado pues, a pesar de ser compactas, los materiales utilizados en la construcción de las bombas, líneas de tuberías válvulas y motores deben ser especificados con características muy especiales y la mayoría de veces fuera de estándares.

En la práctica es común que la mayoría de diseñadores y fabricantes recomienden trabajar con transmisiones de alta presión.

La recomendación se debe a que el costo inicial por la utilización de materiales estándar hacen que la transmisión en ese rango sea la que mejor conjuga la relación costo-beneficio.

Cuando la transmisión tiene definida su presión de operación debe considerarse que en el sistema se presentan otras presiones que dependen directamente de la presión de operación. Las presiones más importantes a



considerar y su descripción son las siguientes: presión negativa o de vacío, de carcaza, de carga, de retorno, máxima y de operación.

**La presión negativa o de vacío** es la que se presenta en la bomba en el momento justo del arranque. Se manifiesta debido a que el vacío generado por el conjunto giratorio al empezar a girar genera vapores al acelerar el fluido dentro de los mecanismos de la bomba. Esta presión debiera desaparecer casi instantáneamente para no fragilizar las paredes de la bomba. En la práctica se trata en la mayoría de circuitos de montar la bomba de modo de aprovechar la presión atmosférica para aliviar ese riesgo.

**La presión de carga** es la presión inicial de que debe disponer una transmisión hidrostática para iniciar y mantener su funcionamiento. La presión de carga y el flujo asociado a ella llamado flujo de carga sirven para cargar la transmisión y son desarrollados por una bomba de carga. La bomba de carga es una bomba auxiliar de la bomba principal y puede estar en un circuito aparte o montada en el eje de la bomba principal. La bomba de carga es un componente crítico de la transmisión y por eso muchos la llaman “el corazón de la transmisión hidrostática”.

Existen circuitos muy simples que no necesitan bomba de carga pero, en los circuitos industriales utilizados para trabajos complejos y eficientes la bomba de carga es vital para su funcionamiento.

Las funciones de la bomba de carga al desarrollar flujo y presión de carga se dividen en dos grupos uno por flujo y otro por presión. Las funciones más importantes de la bomba de carga asociadas con su flujo son:

- a) llenar todo el circuito para iniciar el arranque

- b) rellenar las pérdidas debidas a la ineficiencia del circuito bomba-motor. Lo hace la bomba en el lado de baja presión del circuito para mantener las líneas llenas de fluido y evitar la cavitación de la bomba principal.
- c) Proveer flujo para activar mecanismos de control
- d) Proveer flujo constante a dispositivos de desplazamiento activados eléctricamente
- e) Proveer flujo para circuitos auxiliares
- f) Rellenar el circuito para demandas derivadas de cargas cíclicas o erráticas.

Las funciones de la bomba de carga asociadas con la presión de carga son:

- a) Mantener una presión correcta en el circuito para asegurar suficiente fuerza en el conjunto giratorio
- b) Proveer la presión necesaria para activar los mecanismos de control
- c) Proveer la presión necesaria para las funciones de los circuitos auxiliares
- d) Proveer la presión necesaria para activar y coordinar las válvulas de alivio de carga y las válvulas de alivio de limpieza del circuito.

Es importante saber que la bomba de carga lleva integradas a ella válvulas de alivio ajustables que ayudan a compensar y corregir pequeñas desviaciones en la presión de carga.

Cuando las desviaciones son considerables son un síntoma de que en la bomba de carga existen partes gastadas o dañadas y si el desgaste o el daño es considerable conocerlo sirve para tomar acciones correctivas cambiando esas partes o cambiando la bomba de carga.

**La presión de carcaza.** Es la presión interna que se produce en la carcaza debido a fugas internas entre las partes móviles de los mecanismos. Esas fugas siempre existen, son inherentes al diseño, ya que se dan por las holguras en las dimensiones de los elementos móviles, por ejemplo, en una bomba o

motor de pistones para que los pistones se deslicen dentro de los cilindros, el diámetro de los pistones es ligeramente menor al diámetro interior de los cilindros y entre el pistón y el cilindro se producen las fugas. También, el fluido que pasa por el agujero central del pistón y sale por la zapata, lubrica entre las zapatas y la placa deslizante y regresa a la carcaza.

En condiciones normales de operación el valor de la presión de carcaza debe estar debajo del valor de la presión de carga, ya que si sube demasiado puede haber rotura de sellos, empaques o incluso la misma carcaza. Para controlar y mantener la presión de carcaza la mayoría de bombas y motores se les coloca en la carcaza una tubería de drenaje (conocida como tubería de drenaje de carcaza, que regresa el fluido al tanque. Obviamente esta tubería aparte de su válvula de control debe dejar que el fluido salga libremente. Para fines de evaluación de la eficiencia del equipo hidráulico el valor nominal de la presión de carcaza, dado por el fabricante, es vital ya que el incremento de ese valor es una señal clara de que las fugas internas están aumentando. Al aumentar las fugas internas la bomba de carga debe estar rellenando mayor cantidad de fluido, la unidad demandará más potencia para hacer el mismo trabajo. También el aumento de fugas indica desgastes internos y si son muy altos puede romperse la carcaza.

**La presión de retorno** también conocida como contrapresión es la que se manifiesta en el lado de descarga hacia el circuito hidráulico o al tanque. Se debe principalmente a las restricciones de flujo impuestas por la tubería, válvulas, intercambiadores de calor y filtros. A pesar de que el circuito este bien diseñado esas restricciones siempre existen y el mejor diseño lo que persigue es que sean mínimas para un funcionamiento óptimo.

**La presión máxima** es la presión intermitente máxima permitida en el circuito y es determinada por la demanda a carga máxima de la máquina. Se asume que esta presión se le exige a la transmisión en un porcentaje muy pequeño del tiempo de operación. Ese porcentaje generalmente se establece menor al 2% del tiempo total de operación. Si la presión máxima se mantiene o se requiere muy frecuentemente o por largos periodos de tiempo, la vida útil de la transmisión se reduce grandemente.

**La presión de operación** o de trabajo es la presión para la cual se diseña la transmisión hidrostática y es a la cual trabajará la mayor parte del tiempo y es la más importante en cuanto a costo inicial y de funcionamiento.

En general, en la transmisión hidrostática debe tenerse cuidado de que la presión máxima se dé en períodos intermitentes y muy cortos de tiempo, que la presión de carga siempre sea mayor que la presión de carcasa y de retorno para lograr una mayor eficiencia y prolongar la vida del equipo.

**Velocidad.** En las transmisiones hidrostáticas se pueden diferenciar dos velocidades, una es la que recibe la bomba hidráulica de la fuente motriz y la otra la que desarrolla el motor. En la mayoría de las aplicaciones las velocidades mas comunes que la fuente motriz entrega a las bombas hidráulicas de uso industrial son 1200 y 1800 revoluciones por minuto (RPM). Las bombas con velocidades arriba de 1800 rpm se utilizan en transmisiones de baja potencia y en aplicaciones muy especiales, trabajos de micro precisión,

debido a su alto costo, mayor riesgo de cavitación y nivel de ruido excesivo. Dependiendo de la velocidad de entrada y del tipo de bomba, la bomba puede entregar cantidades constantes o variables de flujo en función de su diseño. Debido a que las fugas internas se incrementan en la medida que aumenta la velocidad y la bomba demanda más potencia para realizar el mismo trabajo, es que existen límites en la velocidad de operación de la bomba.

En un motor hidráulico la velocidad a la cual girará su eje esta en función de que tan rápido su conjunto giratorio sea llenado con fluido y del tamaño (desplazamiento) del motor. Lo anterior se visualiza mejor en la siguiente formula que define la velocidad del motor,

$$\text{Velocidad del motor} = \text{flujo} / \text{desplazamiento (tamaño del motor)}.$$

Tanto en el motor como en la bomba la más alta velocidad a carga completa es la velocidad nominal continua especificada por el fabricante para cumplir con la vida útil estipulada. Cuando la velocidad se mantiene por largos períodos de tiempo, arriba de la velocidad nominal, el equipo disminuye su vida útil y se corre el riesgo de destruirlo.

Normalmente la vida útil está dada en términos de L10 o L20 horas (10% o 20%) de utilización para el conjunto giratorio basado en recomendaciones publicadas para un fluido con la limpieza y la viscosidad óptimos.

**Flujo.** El flujo o caudal es el volumen de fluido fluyendo a través de una tubería en un período de tiempo. Las bombas hidráulicas son clasificadas de acuerdo a su capacidad volumétrica a una presión y velocidad especificada por su desplazamiento (flujo) por revolución. La capacidad volumétrica es su descarga medida como la cantidad de fluido que la bomba puede entregar en su puerto de salida por unidad de tiempo a una velocidad y presión establecidas. La descarga usualmente se expresa en galones por minuto o

litros por minuto. Como la velocidad de entrada de una bomba respecto de otras puede ser diferente y la descarga de la bomba depende de esa velocidad, existen normas de estandarización para poder compararlas.

Esas normas establecidas por la Sociedad de Ingenieros Automovilísticos, SAE, en las cuales se establece que “la descarga de una bomba es el flujo del fluido desarrollado por la bomba a 1000 rpm y 100 psig con el fluido a 120 °F”.

El flujo del fluido no puede tratarse en forma separada de la presión y la velocidad, ya que están íntimamente relacionados. Por eso es que cuando se quiere variar el flujo debe variarse la velocidad de entrada o mantenerse fija la velocidad de entrada y variar el desplazamiento de las partes internas móviles de la bomba. En el caso de las bombas de engranes la variación del flujo es muy difícil si no se varía la velocidad de entrada. Una forma sería cambiando los engranes a otros más pequeños o más grandes pero eso, obviamente no es fácil. Es por eso que este tipo de bombas casi siempre se usan cuando se requiere flujo constante.

En las bombas de paletas el flujo se puede variar descentrando el eje del conjunto giratorio con respecto de la carcasa utilizando para ello un aditamento externo, por ejemplo, un tornillo graduado.

En las bombas de pistones cambiar el flujo es relativamente fácil, ya que variando la carrera de los pistones por medio de la variación de ángulo de la placa deslizante pueden obtenerse diferentes flujos. La principal ventaja de poder cambiar el flujo de acuerdo a la demanda del sistema es que permite reducir el consumo de potencia proporcionalmente a la carga.

**Torque.** El torque es la resistencia que genera una carga aplicada al eje del motor hidráulico. La resistencia de esa carga es la que debe vencer el motor y para eso combina su desplazamiento con la presión que desarrolla la bomba en el conjunto giratorio del motor. El torque para muchos fabricantes de motores hidráulicos define el tamaño del motor. Además para iniciar y mantener una determinada velocidad en su eje, el motor combina su desplazamiento y el flujo de fluido proveniente de la bomba.

En general, la importancia de las variables descritas es que permiten comprender y analizar su interrelación en las fórmulas que sirven para calcular la potencia de una transmisión hidrostática.

Para calcular el tamaño de los motores y las bombas hidráulicas las variables se relacionan por las formulas generales siguientes,

$$\text{Velocidad del motor hidráulico (rpm)} = 231 \times \text{flujo (gpm)} / \text{Desplazamiento del motor (pulgadas cúbicas / minuto)}$$

$$\text{Torque ( libras – pulgada)} = \text{Presión (psi)} \times \text{Desplazamiento del motor (pulgadas cúbicas)} / 2 \times \text{Pi}$$

$$\text{Descarga de la bomba (gpm)} = \text{rpm} \times \text{desplazamiento (pulgadas cúbicas / revolución)} \times \text{eficiencia volumétrica} / 23$$

$$\text{Torque (libras – pulgada)} = \text{Presión (psi)} \times \text{Desplazamiento (pulgadas cúbicas/ revolución)} / 2 \times \text{Pi} \times \text{eficiencia.}$$

En las fórmulas anteriores,

rpm = velocidad, en revoluciones por minuto

gpm = flujo, en galones por minuto

Pi = constante, 3.141593

psi = presión, libras por pulgada cuadrada

### **2.2.2 Características de los sistemas estándar y los sistemas de alto torque y baja velocidad**

En todos los sistemas hidráulicos pueden usarse bombas y motores del tipo de engranes, paletas y pistones. Como ya se mencionó anteriormente, para que un sistema hidráulico pueda llamarse apropiadamente transmisión hidrostática es necesario que la bomba, el motor o ambos sean de desplazamiento variable. Debido a la dificultad de lograr desplazamiento variable en las bombas y motores de engranes y paletas, por las características inherentes a ellos, en las transmisiones hidrostáticas aplicadas industrialmente se utilizan preferentemente bombas y motores de pistones de desplazamiento variable.

Considerando lo anterior, la importancia de la bomba en la transmisión hidrostática se limita a escoger una que sea de desplazamiento variable y que proporcione el flujo y la presión necesarios para el motor. En ese sentido, la mayoría de bombas de ese tipo cumplen con los dos requisitos y se encuentran fácilmente en tamaños estandarizados por los fabricantes.

Una dificultad aunque de menor importancia en su escogencia sería definir el tipo de protecciones y controles auxiliares que dependen específicamente de cada aplicación. En el caso de los motores, como se verá más adelante, la elección no es tan sencilla. Podría asumirse que, como la potencia del motor está basada en los valores de la velocidad y el torque, todos los motores pueden desarrollar su potencia total consistentemente a alto torque y baja velocidad pero esto no es cierto. En los motores estándar exigirles baja velocidad a bajo torque no representa ningún problema. El problema se presenta cuando se les requiere baja velocidad y alto torque porque el aumento de fuerza necesario para iniciar el movimiento de la carga, el aumento



de las fugas internas y el aumento de la fricción estática, que se generan a alta presión, no permiten la rotación del eje a baja velocidad en forma constante y sin pulsaciones. Existen en el mercado motores hidráulicos estándar clasificados desde microprecisión hasta de alto torque y baja velocidad, pero, en esta clasificación al hablar de baja velocidad se refieren a cientos incluso miles de revoluciones por minuto y que no satisfacen los requerimientos de una aplicación en molinos cañeros que necesitan entre 3.0 y 8.5 rpm.

Los motores de alto torque y baja velocidad de tamaño apropiado para usarse en molinos cañeros fueron desarrollados partiendo del diseño de los motores estándar de alto torque y baja velocidad. En la década de los sesenta del siglo veinte, estos motores fueron utilizados principalmente en la industria naval y minera.

Después de muchos años funcionando en esas industrias se llevó a cabo una investigación de aproximadamente diez años en la industria azucarera y su diseño fue nuevamente mejorado y adaptado a las condiciones tan singulares de los molinos cañeros. El desarrollo consistió en lograr motores que suministrarán alto torque a velocidades desde cero rpm hasta 50 rpm sin pulsaciones en el eje y con la potencia necesaria.

En resumen la característica más importante que diferencia a un motor estándar de uno de alto torque y baja velocidad es la capacidad de éste último de operar a baja velocidad y alto torque sin pulsaciones.

A pesar de que no hay una clasificación normalizada ni precisa de los tamaños de los motores hidráulicos pueden distinguirse algunos rangos de operación comunes entre los diferentes fabricantes. Los rangos de operación en función del desplazamiento, presión, velocidad y torque y las aplicaciones para las cuales se recomiendan están comprendidos en la tabla IV.

**Tabla IV. Rangos de operación motores hidráulicos**

Tipo de aplicación	desplazamiento	Presión	Velocidad	Torque
Servicio ligero (robótica, micro)	0.8 - 60	100 - 3000	2500 - 25000	8 - 9200
Servicio normal	6.0 - 250	3000 - 3500	400 - 2000	80 - 3,000
Servicio pesado	200.0 - 600	3000 - 3500	150 - 450	2000 - 8,000
Estándar de alto torque y baja velocidad	150.0 - 2300	3000 - 3500	25 - 150	2000 - 30,000
Para molinos cañeros de alto torque y baja velocidad	50. - 12000	3000 - 4500	0 - 50	5000 - 30,000

Las dimensionales en la tabla son como sigue:

- Desplazamiento : pulgadas cúbicas / revolución
- Presión : libras / pulgada cuadrada
- Velocidad : revoluciones / minuto
- Torque : libras – pié / 1000 libras / pulgada cuadrada.

En los valores de la tabla se puede visualizar la diferencia tan grande de los motores de alto torque y baja velocidad para molinos cañeros respecto de los usados en otras aplicaciones.

### **3. EMPLEO DE UNA TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA EN UN MOLINO CAÑERO**

#### **3.1 Antecedentes**

Debido a condiciones externas el ingenio se ve en la necesidad de aumentar paulatinamente su molienda y proyectar moliendas mayores para un futuro cercano. El incremento de la capacidad de producción de un ingenio depende del aumento de la molienda. La capacidad de molienda está definida por el tamaño de los molinos y sus transmisiones de potencia. Por lo anterior, se procedió a evaluar las transmisiones actuales. En la evaluación se encontró que, de un desgaste insignificante y normal para las condiciones originales de operación, con los aumentos que se habían dado en la molienda se estaba iniciando un desgaste acelerado en los dientes de los engranes de las transmisiones. Temiendo que el deterioro de la zona endurecida de los dientes pasara a la zona blanda, donde ya su capacidad de carga es casi nula, se procedió a pensar en la sustitución de las transmisiones. La sustitución podía hacerse con otras del mismo tipo pero de mayor potencia o usando tecnología alterna. Para aprovechar la sustitución se acordó que la opción adoptada de ser posible, permitiera asegurar moliendas mayores, ahorrar energía térmica en las turbinas y lograr aumentar la molienda en el futuro sin mayores cambios en el ya limitado edificio de molinos.

En base a esas premisas se plantearon las siguientes opciones, a) cambiar totalmente las transmisiones actuales por otras más potentes y, b) sustituir las

transmisiones actuales con tecnología alterna. Los diferentes cambios e implicaciones a considerar para la primera opción son los siguientes,

- Cambiar las turbinas de vapor actuales de una sola etapa a turbinas multietapas . Para las condiciones de vapor disponible con las turbinas multietapas se logra mayor potencia y mayor eficiencia pero requieren mayor espacio físico. También, igual que en las turbinas actuales la velocidad solo se puede variar totalmente y en rangos muy pequeños sin afectar su eficiencia grandemente.
- Cambiar las transmisiones de engranes actuales. Debido a que la potencia de los engranes es función del tamaño de los dientes mayor potencia implica engranes mas grandes y por ende, mayor espacio físico. Ese mayor espacio implica trabajos grandes de obra civil en las cimentaciones actuales.
- Las turbinas y reductores de mayor potencia permitirían aumentar la molienda en el futuro pero en la actualidad se estarían subutilizando.
- Cambiar todas las turbinas y las transmisiones es un trabajo tan grande que no se podría hacer en el tiempo disponible (época de no zafra)
- La inversión necesaria estaría en el orden de varios millones de dólares.

La segunda opción, usar tecnología alterna con transmisiones hidrostáticas, puede visualizarse de dos maneras, a) sustituir completamente

las transmisiones actuales por transmisiones hidrostáticas en todas las mazas del molino o, b) quitarle carga parcialmente a las transmisiones actuales montando una transmisión hidrostática a una de las mazas inferiores del molino. Esta aplicación se conoce como repotenciación.

La sustitución total de las transmisiones consiste en montar un motor hidráulico en cada maza inferior y uno o dos motores hidráulicos en la maza superior.

Esta aplicación conlleva las siguientes consideraciones,

- Inversión en equipos adicionales de generación eléctrica para los motores eléctricos de la transmisión hidrostática. Esto ocurre si no hay suficiente capacidad eléctrica en el ingenio.
- Cambiar o modificar todos los ejes de las mazas para adecuarlos a los motores hidráulicos. Cambiar todos los ejes obligaría a deshacerse de los ejes actuales y encamisar todos los nuevos ejes. Lo anterior resulta muy oneroso ya que se desecharían ejes en buen estado.
- La modificación de todos los ejes sería menos oneroso pero difícilmente se puede hacer en una temporada de no zafra.
- Las transmisiones hidrostáticas debieran adquirirse de un tamaño tal que permitan moliendas mayores en el futuro. A pesar de que por su diseño se pueden adquirir ya proyectadas, en el inicio se estarían subutilizando y afectarían eléctricamente al ingenio.

**Repotenciar las transmisiones actuales.** Esta alternativa presenta las siguientes consideraciones,

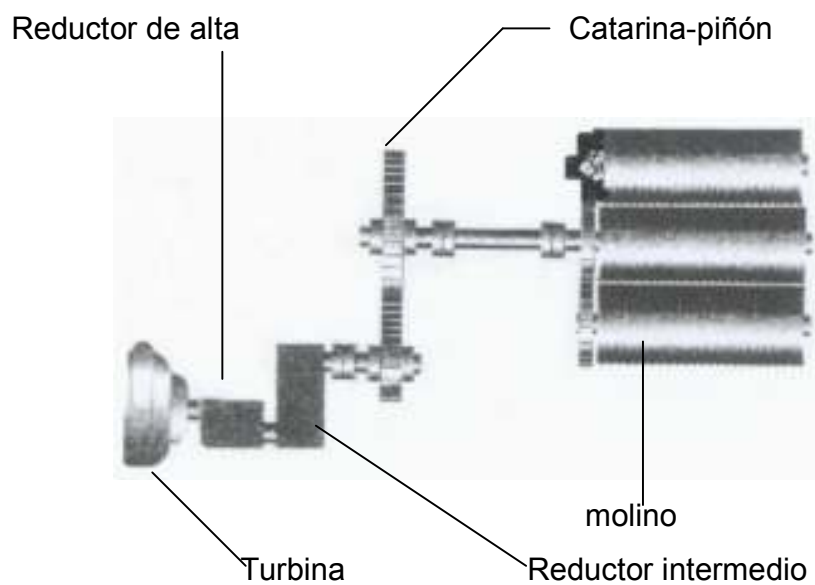
- Se puede hacer montando una transmisión hidrostática para una maza al inicio. Esto alivia la transmisión actual
- Introduce potencia adicional al molino
- Existe la flexibilidad de aumentar la potencia del molino según se vaya requiriendo agregando motores hidráulicos a otras mazas.
- La unidad de potencia y el motor hidráulico tienen mejor eficiencia que las turbinas de una sola etapa
- No implica trabajo fuerte de obra civil, solo una base pequeña para el brazo tensor
- El espacio físico necesario es pequeño
- Se puede variar la velocidad de la maza inferior por debajo o por arriba del valor de velocidad de la maza superior
- Se puede automatizar la transmisión hidráulica
- Permite una medición exacta del torque y energía consumida
- Se puede cambiar el sentido de rotación de la maza

Una ventaja común al uso de la transmisión hidrostática ya sea total o parcial en su aplicación, la energía eléctrica necesaria se generaría en un turbogenerador. Los turbogeneradores son más eficientes que las turbinas de una sola etapa de los molinos. La diferencia de consumo de vapor entre el turbogenerador y la turbina puede aprovecharse para vender más electricidad o utilizarse en otros equipos del ingenio. La tendencia en los ingenios es utilizar turbogeneradores que trabajen con presiones de vapor arriba de 200 psig, lo cual los hace más eficientes y su rendimiento, usando transmisiones hidrostáticas se incrementa.

En la figura 31, se puede apreciar un molino con transmisiones hidrostáticas en todas sus mazas. La figura muestra dos esquemas en el primero un molino con su transmisión tradicional y en el segundo esquema se ve un molino con una transmisión hidrostática en una maza inferior.

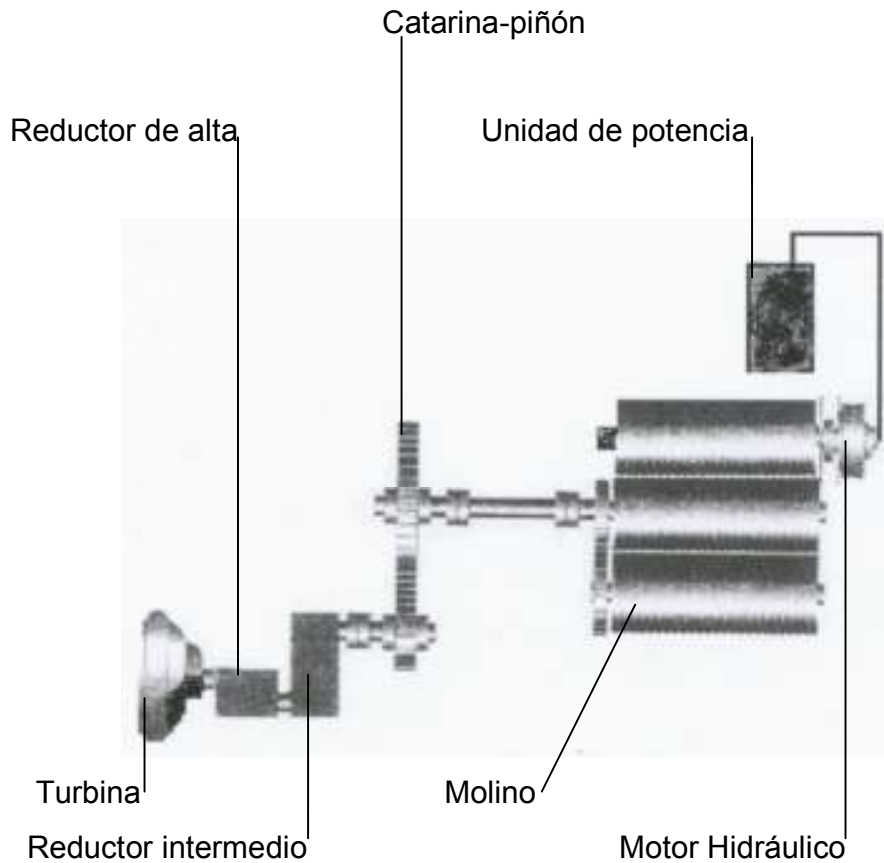
**Figura 31. Transmisión Tradicional y transmisión Hidrostática en maza inferior**

**Esquema de molino con transmisión tradicional**



*continuación*

**Esquema de molino con motor hidráulico en una maza inferior.**



De acuerdo a las consideraciones explicadas en el punto 3.1, la propuesta consiste en utilizar una transmisión hidrostática, unidad de potencia y motor hidráulico, en la maza cañera de los molinos.

La etapa inicial consistiría en repotenciar los dos molinos con transmisiones más débiles, los de 700 HP; y luego seguir con los otros cuatro molinos. Repotenciar dos molinos es factible en una temporada de no-zafra ya que, como se verá mas adelante, su instalación no necesita trabajos fuertes de cimentación.



Hacer la instalación en la maza cañera permitiría mantener uniforme el flujo de caña a través del molino, ya que ésta actúa en la entrada junto con la superior. Otra ventaja que presenta es que el ajuste de abertura del molino regularmente se hace en la maza bagacera y con el motor hidráulico en la bagacera sería muy complicado hacerlo.

Por el sinnúmero de variables que entran en juego en la operación de un molino como son: variedad de caña, cantidad de fibra, tamaño de las mazas, presión hidráulica, ajustes y aberturas entre mazas, etc., la determinación exacta de la potencia consumida por cada maza del molino se hace difícil si no imposible.

En estudios y observaciones hechas a lo largo del tiempo el consumo de cada maza, debido a que todas las mueve una sola turbina, se ha inferido en función del consumo total del molino y se han logrado valores que aunque diferentes sirven de guía para determinar el tamaño de la transmisión hidrostática a utilizar.

El ingeniero E. Hugot,<sup>1</sup> una autoridad en ingenios azucareros cuyos estudios hechos a mediados del siglo veinte siguen vigentes en muchos aspectos, estableció que la maza superior consume aproximadamente el 56%, la maza cañera 22% y la maza bagacera 22% de la potencia total del molino.

En los estudios llevados a cabo por Rusell y Murry en 1968,<sup>2</sup> estimaron consumos de 50% para la maza superior , 25% para la cañera y 25% la bagacera.

---

1 E. Hugot, Handbook of cane sugar engineering, 3° edition, 1986, pág. 235

2 Rusell, G.E., Murry C.R., "A method of determination setting for three roller mills, 35° conference Queensland Soc. Sugar cane tech. 1968.

En estudios más recientes, hechos con tecnología más apropiada, Lewinsky y Muñoz,<sup>3</sup> han obtenido valores de 65% la maza superior, 20% la cañera y 15% la bagacera. Las transmisiones actuales del ingenio están basadas en estudios de consultores particulares en 14 HP / tonelada de fibra hora. Los fabricantes de transmisiones hidrostáticas sugieren utilizar valores dentro del rango de 16 a 24 HP / tonelada de fibra hora ya considerando un 10% de potencia adicional por la cuarta maza.

### **3.2 Propuesta para aplicar la transmisión hidrostática en una maza de un molino cañero**

Para hallar el tamaño de la transmisión hidrostática propuesta, se utilizará información publicada por los diferentes autores considerados autoridades en molienda de caña, datos obtenidos de los registros del ingenio y las condiciones en que trabajará la transmisión. Los cálculos se harán bajo las siguientes condiciones:

- Caña molida: 13,000 toneladas / día = 542 toneladas / hora .
- Velocidad actual del molino: 6.0 revoluciones / minuto (rpm)
- Contenido de fibra en caña: 12.5% y 13.5% . El valor de 12.5% es un promedio obtenido de zafras anteriores que ocurre aproximadamente el 67% del tiempo de zafra. El 33% del tiempo restante ese valor sube a aproximadamente 13.6%, período conocido como de alta fibra
- Velocidad máxima considerada en la maza cañera: 30% arriba de la velocidad de la maza superior, en forma proporcional.

---

Muñoz, G., Lewinsky, J. , CIATEQ México, I congreso anual de la SOMIM, Queretaro, Agosto, 1995.

Para condiciones de fibra promedio y para condiciones de alta fibra se harán los respectivos cálculos del tamaño del motor hidráulico. Si la diferencia en la potencia calculada implica una diferencia de inversión muy alta, la decisión pasara a ser de tipo económico.

### *Cálculos*

Fórmula general,

Toneladas de fibra en caña = toneladas de caña / hora X % de fibra en caña

Para 12.5% de fibra: Fibra en caña (toneladas / hora) = 542 x 12.5% = 67.75

Para 13.5% de fibra: Fibra en caña (toneladas / hora) = 542 x 13.5% = 73.17

Usando el valor estimado de 14 Hp / fibra en caña toneladas / hora que es el más adecuado al ingenio; la potencia nominal del molino viene dada por la siguiente fórmula.

En general,

Potencia Teórica (Hp) = fibra en caña (toneladas / hora) x Hp / fibra en caña (toneladas / hora)

Para 12.5% fibra: Potencia teórica = 67.75 x 14 = 948.50 Hp

Para 13.5% fibra: Potencia teórica = 73.17 x 14 = 1024.38 Hp

Adicionando el 10% recomendado por los fabricantes para molinos con cuarta maza como los del ingenio, el valor de la potencia teórica será,

Para 12.5% fibra: potencia teórica = 948.50 x 1.10 = 1043.350 Hp

Para 13.5% fibra: potencia teórica = 1024.38 x 1.10 = 1126.818 Hp

Asumiendo una eficiencia de la transmisión del 80% (80% es un valor recomendado para el cálculo este tipo de transmisiones) se obtiene la potencia a instalar,

Potencia a instalar = Potencia teórica (Hp) / eficiencia de la transmisión(%)

Para 12.5% fibra: Potencia a instalar (hp) =  $1043.350 / 0.80 = 1304.19$

Para 13.5% fibra: Potencia a instalar (hp) =  $1126.818 / 0.80 = 1408.52$

Basados en los estudios realizados, ya citados anteriormente en 3.1, se puede adoptar un valor de 22.5% de la potencia total consumida por el molino para la maza cañera. De acuerdo a lo anterior, la potencia necesaria para la maza cañera será,

Potencia de la maza cañera (hp) = Potencia total del molino x 22.5%

Para 12.5% fibra: potencia de la maza cañera =  $1304.19 \times 0.225 = 293.44$  hp.

Para 13.5% fibra: potencia de la maza cañera =  $1408.52 \times 0.225 = 316.92$  hp.

Para poder obtener el beneficio de la capacidad de variación de velocidad por medio de la transmisión hidrostática los fabricantes de estos equipos para molinos cañeros permiten variaciones de  $\pm 30\%$  de la velocidad nominal de la maza superior. En el cálculo del torque necesario a desarrollar por el motor hidráulico se debe utilizar la velocidad máxima. En este caso que la velocidad normal es 6.0 rpm la velocidad máxima será,  $6.0 \times 1.30 = 7.8$  rpm.

La fórmula para calcular el torque a velocidad máxima es,

Torque a velocidad máxima (lb.-pie) =  $5252 \times \text{potencia (hp)} / \text{velocidad máxima (rpm)}$

Para 12.5% fibra: Torque (lb.-pie) =  $5252 \times 293.4422 / 7.8 = 197,584.414$

Para 13.5% fibra: Torque (lb.-pie) =  $5252 \times 316.9176 / 7.8 = 213,391.184$

El valor del torque para un motor hidráulico generalmente es referido a la presión de trabajo. La presión de trabajo para estas aplicaciones tiene valores de 2500psig. o 3000 psig. y presiones máximas de 5000 psig.

Usando 3,000 psig. como presión de trabajo se obtiene el torque unitario, La fórmula general es,

Torque hidráulico unitario = torque a velocidad máxima / Presión de trabajo

Para 12.5% fibra: Torque hidráulico unitario =  $197,584.414 / 3,000$   
= 65.8615 lb.-pie / psig.

Para 13.5% fibra: torque hidráulico unitario =  $213,391.184 / 3,000$   
= 71.1304 lb.-pie / psig.

En hidráulica es usado por los fabricantes el término Torque Especifico para clasificar los motores hidráulicos sobre la base de su rendimiento, haciendo caso omiso de su tamaño físico o la velocidad a la cual operan. El torque especifico correlaciona la capacidad y las diferencias por variación de características y compara sobre una base común de 1000 psig. En general el torque especifico se define con la formula siguiente,

Torque especifico (lb.- pie / 1000 psig) = torque unitario (lb. – pie) X 1000 psig./1000 psig.

En la propuesta, para 12.5% fibra se tiene,

Torque especifico =  $65.8615 \text{ lb. – pie / psig} \times 1000 \text{ psig. / } 1000\text{psig}$   
= 65,816.50 lb. - pie / 1000 psig.

Para 13.5% fibra,

$$\begin{aligned} \text{Torque específico} &= 71.304 \text{ lb. - pie / psig.} \times 1000 \text{ psig.} / 1000 \text{ psig.} \\ &= 71,304.00 \text{ lb. - pie / 1000 psig.} \end{aligned}$$

El motor hidráulico a utilizar en la propuesta debe escogerse en base a su torque específico y a pesar de haber considerado factores de servicio en su cálculo, para aprovechar los tamaños estándar del fabricante, se recomienda escoger al final aquel motor de tamaño estándar cuyo torque específico cubra el valor calculado siempre por arriba para garantizar la operación del sistema. La anterior consideración facilita la elección del motor ya que los fabricantes regularmente tienen motores con torque específico ya normalizado, de lo contrario se tendría que pedir como especial lo cual lo encarece. Para la presente propuesta se escogerá el motor con un torque específico de 71,304.00 lb. - pie /1000 psig. o mayor que cubre las dos condiciones de fibra.

### **Tamaño de la bomba hidráulica**

Para definir el tamaño de la bomba hidráulica adecuada es necesario calcular el desplazamiento o cilindrada del motor. La bomba debe proporcionar un desplazamiento y flujo que, como mínimo, tenga el valor del desplazamiento del motor. La fórmula para calcular el desplazamiento es la siguiente,

$$\text{Desplazamiento (pulgadas cúbicas /revolución)} = 2 \times \text{Pi} \times \text{torque específico (lb.-pie)} \times 12 \text{ pulgadas} / 1 \text{ pie} / 1000\text{psig}$$

Entonces,

$$\begin{aligned} \text{Desplazamiento(pulg. Cúbicas/revolucion)} &= 2 \times 3.141593 \times 12 \text{ pulg./1pie} \times 1000\text{psig.} \\ &= 5363.1058 \end{aligned}$$

Para la velocidad máxima de 7.80 rpm. el desplazamiento del motor hidráulico será,

Desplazamiento a 7.80 rpm. = 5363.1058 pulg. Cúbicas / revolución x 7.80 revoluciones / minuto

$$= 41,832.219 \text{ pulgadas cúbicas / minuto}$$

El valor 41,832.219 pulgadas cúbicas / minuto es el flujo teórico requerido por el motor y valor teórico para la bomba pero, debido a las pérdidas y fugas en el sistema, los fabricantes recomiendan utilizar una bomba que proporcione por lo menos 10% mas que el flujo teórico requerido por el motor a velocidad máxima. Entonces el flujo que debe entregar la bomba es,  $1.10 \times 41,832.219 = 46,015.4409$  pulgadas cúbicas / minuto, equivalente a 199.20 gpm.

El desplazamiento de las bombas también se expresa en términos unitarios. Utilizando un motor eléctrico de 1800 rpm el desplazamiento unitario de la bomba es,  $46,015.4409 / 1800 = 25.5641$  pulgadas cúbicas / revolución.

La potencia necesaria del motor eléctrico viene dada por la fórmula:

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{\text{Desplazamiento unitario de la bomba (pulgadas cúbicas / Revolución)} \times \text{velocidad de la bomba (rpm)} \times \text{presión (psig)}}{2 \times \text{Pi} \times 63025 \times \text{eficiencia}}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia (hp)} &= 25.5641 \times 1800 \times 3000 / 2 \times 3.141593 \times 63025 \times 0.85 \\ &= 410.122 \text{ hp (aproximadamente equivale a 306 kilowatt).} \end{aligned}$$

### **Tamaño del motor hidráulico**

En resumen, el motor hidráulico debiera tener las siguientes características:

- Torque específico: 71,130.40 lb – pie / 1000 psig o el valor estándar mayor más cercano.
- Desplazamiento o cilindrada: 5363.1058 pulgadas cúbicas / revolución.
- Velocidad máxima: 7.80 rpm.
- Presión máxima: 5,000 psig.

La bomba hidráulica debe tener las siguientes características:

- Desplazamiento unitario: 25.5641 pulgadas cúbicas /revolución.
- Flujo : 200 galones / minuto.

Motor eléctrico:

- Velocidad : 1800 rpm
- Potencia : 410 hp (equivalente 306 Kw.)
- Torque : 14,346 lb. – pulg.

### **3.3 Actividades a realizar previamente**

Para seguir con las actividades necesarias para montar el motor hidráulico, se escoge en la tabla de tamaños de motores del fabricante, el motor que llena las especificaciones este es el Tipo MB 1600 con un torque específico de 81,360 lb. – pie / 1000 psig., desplazamiento de 6,134 pulgadas cúbicas / revolución y 1387 hp. La elección de este tipo de motor nos da en diferentes tablas las dimensiones requeridas posteriormente en el eje de la maza cañera, tamaño de la unidad de potencia, y otros requisitos que deben realizarse previo a montar el motor hidráulico.



### 3.3.1 Modificación de los ejes de las mazas

El diseño de los ejes actuales no contempla espacio para montar el motor hidráulico por lo que requiere modificarlo. En la figura 32, se observa el diseño de los ejes inferiores actuales.

**Figura 32** Diseño de ejes inferiores.

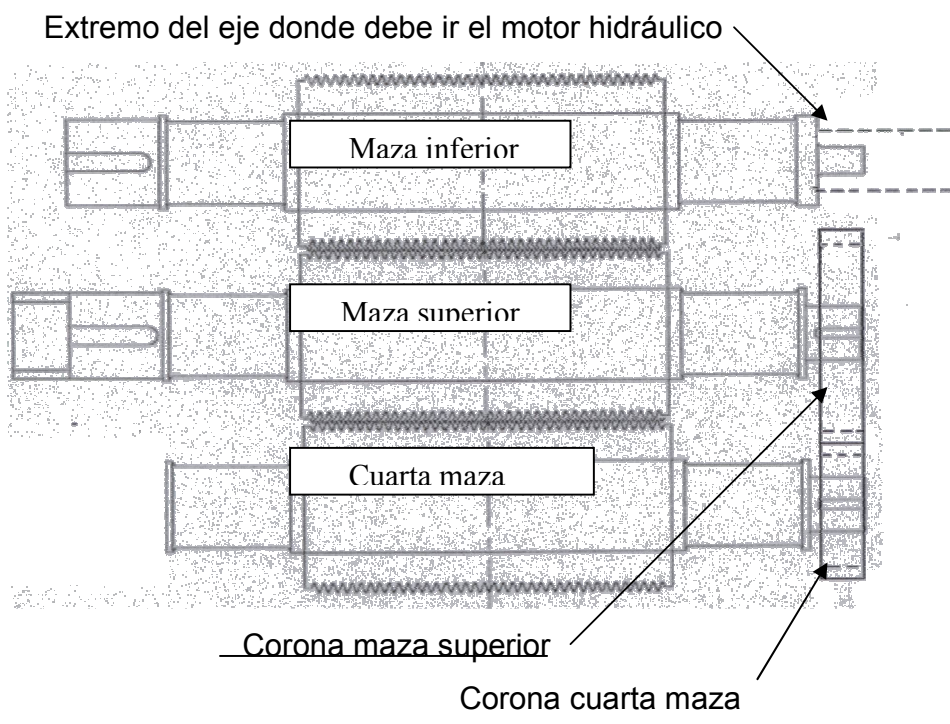


#### 3.3.1.1 Cambio de diseño de un extremo de los ejes

La propuesta consiste en agregar una espiga en el extremo "E" del eje actual ( ver la figura N° 32 ) y en el futuro pedir los ejes nuevos con el largo necesario par hacerles la sección que se necesita. Para facilitar el trabajo en las mazas de los molinos se utilizan los siguientes términos para identificar los extremos de los ejes. El extremo del lado en que la maza superior recibe el movimiento , donde el extremo del eje es cuadrado, se conoce como , lado corona y el otro extremo se conoce como lado espiga ( por la pequeña espiga que siempre han tenido). En los molinos con cuatro mazas la transmisión del movimiento de la maza superior a la cuarta maza se hace del lado espiga.

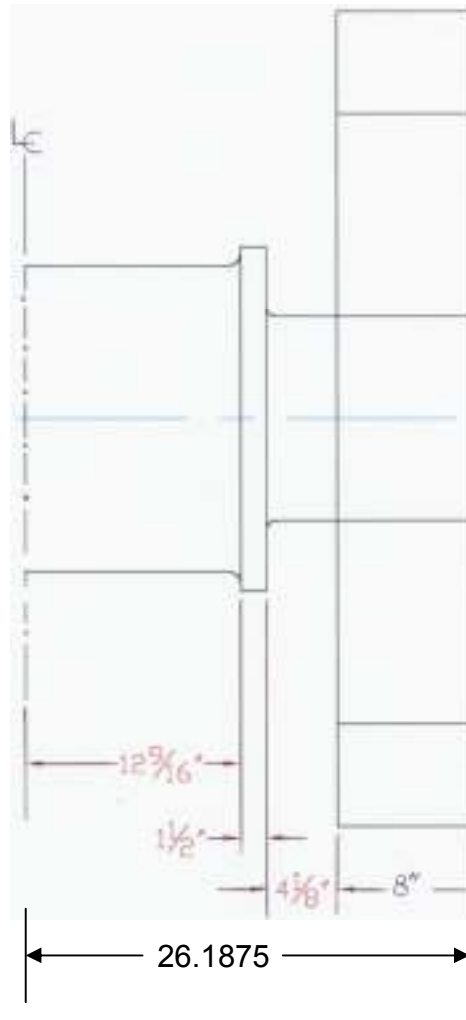
En la figura 33, se visualiza la posición de las coronas de cuarta maza y superior y el lugar donde debiera ir el motor hidráulico en el eje.

**Figura 33. Posición de coronas superior y cuarta maza.**



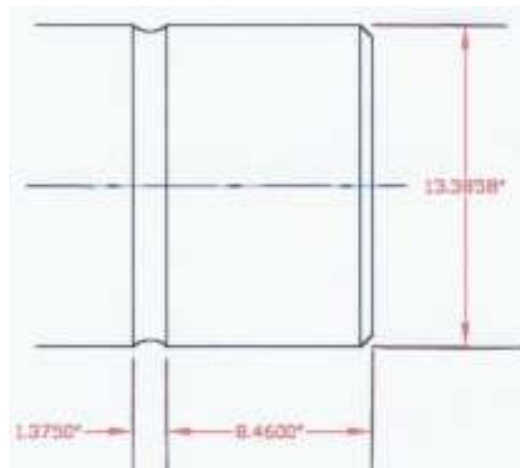
La posición promedio de las coronas de cuarta maza y superior respecto del centro del muñón lado espiga en los molinos del ingenio, es como se aprecia en la figura 34.

Figura 34. Posición actual de las coronas superior y cuarta maza



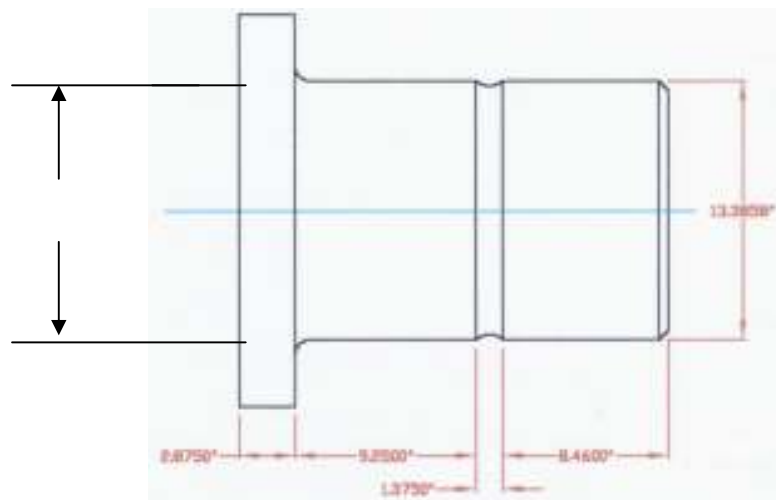
La distancia a librar por la espiga para poner el motor hidráulico es igual a la suma de las medidas en la figura anterior, esto es, 26.1875 pulgadas. El largo de la espiga que se necesita sólo para el motor según tabla del fabricante es de  $8.46 + 1.375 = 9.835$  pulgadas, en la figura 35, se ve la forma y dimensiones de la espiga requerida.

**Figura 35. Espiga requerida para el motor hidráulico**



El extremo de la espiga debe estar a,  $26.1875 + 9.835 = 36.0225$  pulgadas desde el centro del muñón lado espiga. El largo efectivo de la espiga es entonces,  $36.0225 - 12.5625 - 1.500 = 21.960$  pulgadas. Las dimensiones de los largos y diámetros de la espiga quedarían como se ve en la figura 36 siguiente.

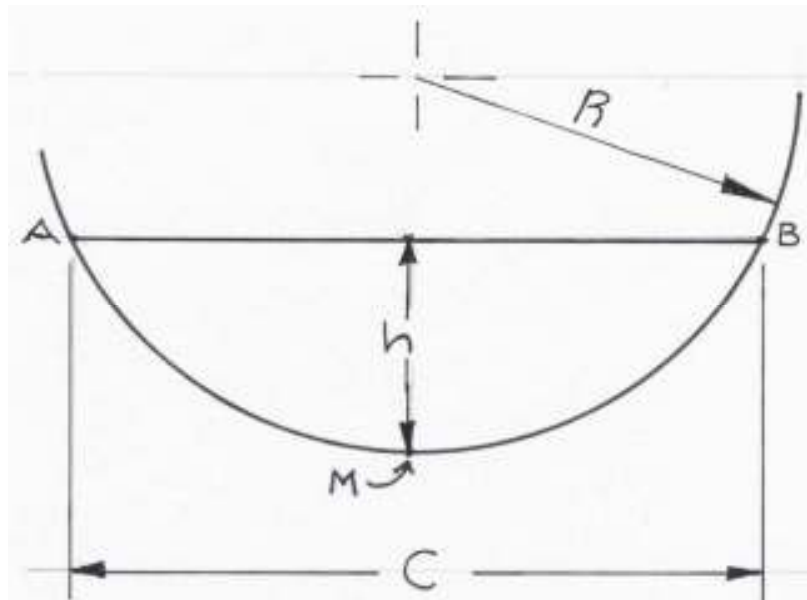
**Figura 36. Dimensiones de espiga**



Aprovechando la diferencia entre los diámetros, 20.000 y 13.3858 se puede hacer un radio de acuerdo bastante grande para que el cambio de sección se suavice y minimice la concentración de tensiones por cambio de sección.

El radio de acuerdo que puede usarse en la sección de 9.250 pulgadas de largo se puede calcular utilizando la similitud geométrica de un segmento circular de una figura plana. La fórmula para calcular el radio de un segmento circular de una figura plana está basado en la figura 37 abajo.

**Figura 37. Radio de un segmento circular**



La fórmula para calcular el radio es:  $R = (C^2 + 4h^2) / 8h$

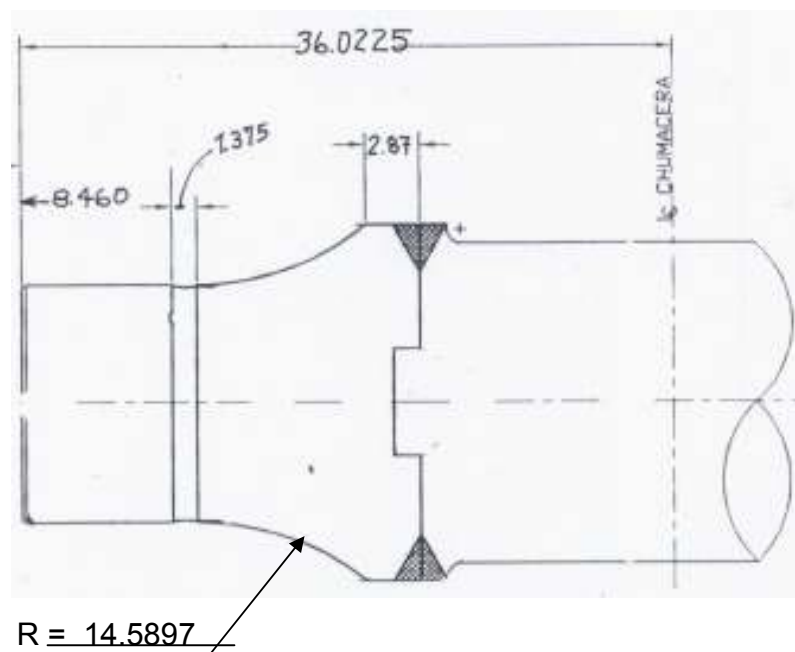
Para el presente cálculo, el punto “M” se hace coincidir con la tangente del eje de 13.3858 pulgadas de diámetro en un punto a 9.250 pulgadas desde el cambio de diámetros, h es la mitad de la diferencia de diámetros o sea,  $h = \frac{1}{2} (20.000 - 13.3858) = 3.3071$  pulgadas, en la figura 38 se presenta la localización de los diferentes puntos y su correspondencia con los puntos del radio de un segmento circular.



Utilizando los valores en la fórmula se tiene, Radio,  $R = (C^2 + 4h^2) / 8h$  ; entonces,  $R = [ ( 18.50)^2 + 4(3.3071)^2 ] / 8 (3.3071) = 14.5897$ ; finalmente la espiga y el eje quedarán como se ve a continuación en la figura 39.

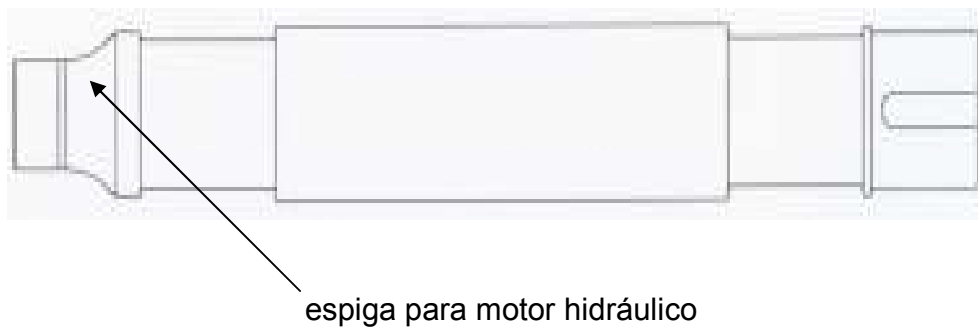
**Figura 39. Diseño final de la espiga y el eje**

Diseño final de la espiga



La espiga puede ir soldada o con *flanges* en la sección de 20.000 pulgadas.

Diseño final del eje inferior.



### **3.3.2 Definición del espacio físico necesario**

La posición del gabinete que contiene la unidad de potencia (motor eléctrico-bomba hidráulica) será adyacente al molino por el lado espiga. El área que se tiene disponible es de 20.0 pies x 15 pies a 5.0 pies de altura desde el centro del eje de la maza.

#### **3.3.2.1 Localización de la unidad de potencia**

La distancia entre la unidad de potencia y el motor hidráulico en cualquier transmisión hidrostática debe ser lo más corta posible. Para esta instalación el fabricante recomienda no pasar de 50.0 pies. Una distancia mayor a 50.0 pies obligaría a usar tubería y accesorios especiales debido al aumento de pérdidas de presión, aumento de calor generado, aumento de ruido, mayor uso de materiales y mayor costo.

Utilizando el área designada en 3.3.2, el motor hidráulico quedará a 10.0 pies de la unidad de potencia. El gabinete mide 4.0 pies x 5.50 pies x 8.50 pies y hay que reservar 2.50, 3.30 y 8.0 pies respectivamente para tareas de mantenimiento. La posición elegida es adecuada para todos los requerimientos.

#### **3.3.2.2 Posición del brazo de torsión**

El brazo de torsión del motor hidráulico sirve para contrarrestar la reacción del torque desarrollado en el eje del motor.

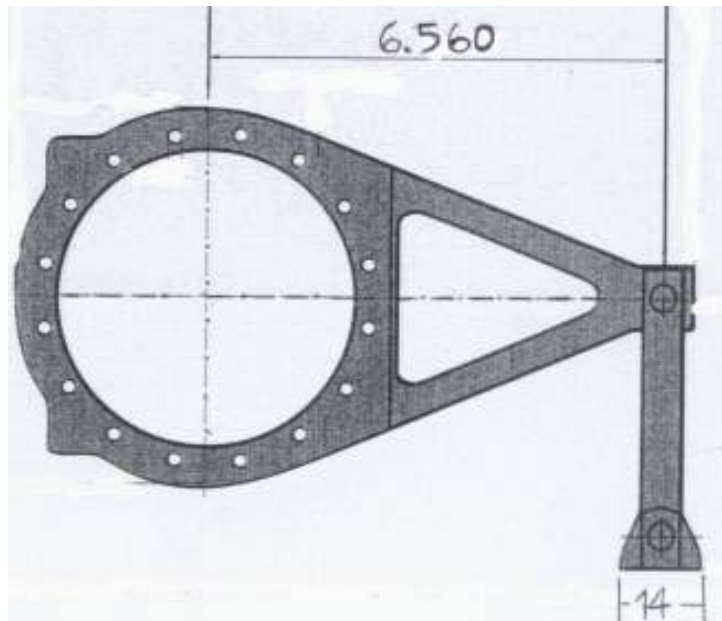


El brazo se ancla a una columna de acero que descansa sobre un pedestal de concreto. La posición del pedestal está definida por el largo del brazo y en dirección opuesta al giro del motor.

En este caso el brazo de torsión tiene por diseño, un torque máximo de 494,181 lb. – pié y del centro de la maza hasta su punto de apoyo tiene 6.56 pies. Para calcular el área del pedestal de concreto debe considerarse que la columna de acero debe tener por lo menos 14” x 14” y la cimentación debe soportar una carga  $F$  derivada de la fórmula,  $T$  (lb. – pié) =  $F$  (lb.) x  $d$  (piés) en donde  $T = 494,181$  lb. – pié y  $d = 6.56$  piés ; de lo anterior,  $F$  (lb.) =  $T / d$  y para este caso,  $F = 75,332$  lb. En la figura 40 se muestra un esquema del brazo de torsión y de su posición en el molino.

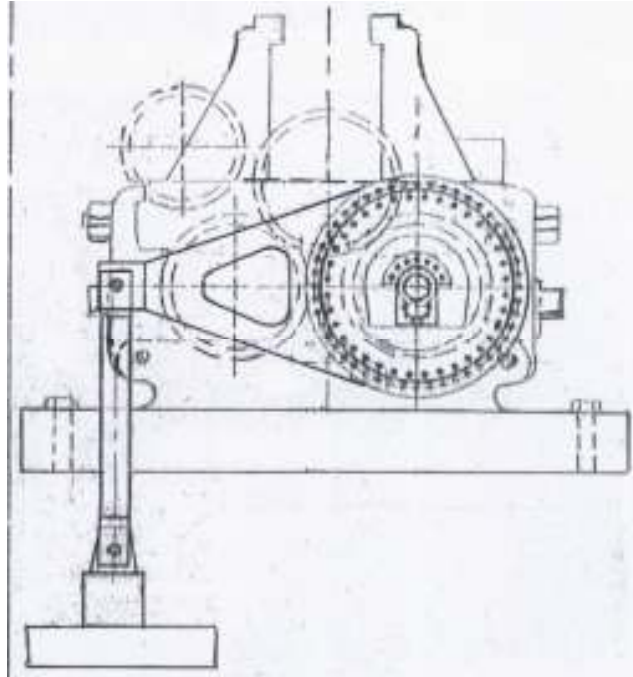
**Figura 40. Brazo de torsión y su posición en el molino**

Brazo de torsión



*continuación*

### Posición del brazo de torsión en el molino



De acuerdo a la literatura especializada, el peso de una zapata independiente (como es este caso) se asume entre 7% y 11% de la carga aplicada. Si se toma 10% el peso de la zapata se puede estimar en  $75332 \text{ lb.} \times 0.10 = 7533.2 \text{ lb.}$  Y el peso total sobre el suelo será de,  $75,332 + 7533.2 = 82,865.20$  libras. La capacidad de carga del suelo en el lugar asignado para la base se puede estimar de  $4,000 \text{ lb. / pié cuadrado}$ .

El área necesaria para la zapata será,  $82,865.20 \text{ Libras} / 4000 \text{ libras /pié cuadrado} = 20.72$  pies cuadrados.

Esta área da lugar para una zapata cuadrada de  $4.5 \text{ pies} \times 4.5 \text{ pies}$ . Esta área está disponible y no hay ningún problema para ejecutar allí la cimentación.

Los cálculos de la distribución y tamaño de los refuerzos de la zapata están fuera del alcance de este trabajo.

### 3.3.3 Disponibilidad de energía eléctrica

La energía eléctrica en el ingenio tiene dos fuentes de suministro, una es la red nacional y la otra es propia generada por turbogeneradores.

La red nacional se utiliza en época de no zafra y los turbogeneradores que funcionan con energía térmica, proveniente de las calderas que operan con bagazo, en época de zafra. Como premisa para instalar una transmisión hidrostática debe evaluarse si se tiene suficiente capacidad instalada en los turbogeneradores, en el caso que nos ocupa si se tiene la capacidad necesaria para la aplicación.

#### **3.3.3.1 Demanda de la unidad de potencia**

Para la aplicación propuesta, la demanda de 410 Hp. (306 Kw.) se hará a los turbogeneradores ya que la transmisión hidrostática solo funcionará en época de zafra. Para satisfacer la demanda como ya se mencionó se cuenta con suficiente capacidad en los turbogeneradores y además, como los turbogeneradores son multietapas y operan a mayor presión de vapor (600 psig) que las turbinas de molinos (200 psig.) y son mas eficientes, de 65 a 70% contra 45% a 50% en las turbinas de molinos, aprovechan mejor la energía térmica proveniente de las calderas. Solamente debe considerarse en que parte de la red eléctrica interna del ingenio conviene cargar la unidad de potencia para lograr mayor eficiencia eléctrica.

#### **3.3.3.2 Transformador de potencia**

En el ingenio los turbogeneradores generan a 13,800 voltios y la mayoría de los equipos operan a 480 voltios. Para lograr ese voltaje están instalados dos transformadores en línea uno de 13,800 a 2,400 voltios y nueve de 2,400 a 480 voltios. Para la instalación de la unidad de potencia de las transmisión hidrostática se necesitan 306 Kw. lo que es una potencia alta. La unidad de potencia debido a su tamaño e importancia en el proceso de molienda necesita una alimentación de voltaje estable, confiable y robusta. En base a lo anterior y con la ventaja de que el motor eléctrico se puede pedir diseñado para el voltaje que mejor convenga al ingenio , la instalación puede hacerse en 2,400 voltios. Esa instalación en ese voltaje daría las siguientes ventajas:

- ahorro de un transformador, se utilizaría en uno de 13,800/2400
- facilidad de transporte de corriente
- menores pérdidas de corriente
- menores fluctuaciones de voltaje (se tendría enganchado a una barra que es más segura ya que no habrían cargas monofásicas)
- ahorro en la cantidad de interruptores
- los interruptores son más robustos a mayores voltajes
- cables más eficientes, menos pérdidas
- menor número de cables

### **3.3.3.3 Tableros y protecciones eléctricas**

El motor eléctrico de la unidad de potencia está acoplado a la bomba hidráulica y su operación continua es muy importante para que la unidad trabaje correctamente. En los tableros eléctricos deben existir las configuraciones eléctricas para la conexión y protección del motor. Las características principales de los aparatos contenidos en los tableros para las funciones de configuración y protección son las siguientes:

Potencia y voltaje de trabajo del motor eléctrico: habiendo calculado la potencia necesaria y la disponibilidad de tensión en el ingenio y sabiendo que conforme la potencia sube es preferible orientar la selección de una conexión en media tensión, 2,400 voltios como se mencionó anteriormente en 3.3.3.2, se procede a seleccionar el interruptor principal.

El interruptor principal proveerá conexión y desconexión automática o manual de la barra de alimentación hacia el motor eléctrico, proporcionará señales de mando para el operador, indicaciones de estado al sistema de control y los enclavamientos de seguridad ante emergencias colectivas. La función de protección a usar en la aplicación puede ser realizada por un *relé* de protección electrónico o varios electromecánicos. Con este relé se debe conseguir la protección de sobrecarga y cortocircuito como mínimo. La tecnología disponible ofrece *relés* con características de protección particularmente adecuadas para la aplicación. En base a las características pueden configurarse distintas curvas de disparos, pantallas con información en línea de potencia, amperaje, voltaje, factor de potencia, etc., registros históricos y capacidad de ser comunicados al sistema de control.

### **3.3.4 Equipos necesarios para automatización**

Estos equipos se refieren a los que se necesitan para conectarse el sistema de control entre sí y con los equipos de automatización ya instalados en el ingenio y para garantizar y asegurar el control y registro de la operación de la transmisión hidrostática aún habiendo fallas de voltaje.

#### **3.3.4.1 Controlador lógico programable (PLC)**

Un controlador lógico programable es un miembro de la familia de las computadoras que usa circuitos integrados en lugar de dispositivos electromecánicos para realizar funciones de control. Es capaz de almacenar instrucciones tales como, funciones aritméticas, contadores, manipulación de datos y comunicaciones orientadas a manipular maquinaria industrial y procesos. La mayoría de controladores consisten de una unidad central de proceso (CPU), fuente de alimentación, memoria, y circuitos apropiados para recibir datos de entradas y salidas.

Un PLC trabaja continuamente ejecutando un programa que esta compuesto de varias ordenes, secuencias y decisiones necesarias para que trabaje el proceso a automatizar. El programa puede ser creado por el usuario encargado de automatizar el sistema. El ciclo interno de operación de un PLC puede dividirse en tres pasos importantes: el primero que es verificar el estado de las entradas, verifica cada una de las entradas y determina si se encuentran encendidas o apagadas y luego las almacena en la memoria.

El siguiente, ejecutar programa, realiza de una en una las instrucciones programadas y efectúa las funciones requeridas con la información en memoria. El último paso, actualizar estado de salidas, consiste en que una vez ejecutado el programa, existen resultados de las decisiones y funciones que son actualizadas a las salidas encendiéndolas o apagándolas. Al terminar el último paso se inicia la secuencia de nuevo. El ciclo se repite en tiempos programables o fijos.

#### **3.3.4.2                    Sensores de velocidad angular del            reductor y el motor hidráulico**

La transmisión hidrostática propuesta para el molino normalmente utiliza dos sensores de velocidad. Uno de los sensores va montado en el extremo del eje de la catarina (del lado de la turbina) o en el extremo libre del eje del reductor de baja, si no hay catarina, y el otro en el eje del motor hidráulico. Este tipo de sensores de velocidad que industrialmente son conocidos como *Encoders* tienen un disco codificado, con marcas digitalmente impresas, que va acoplado a un eje. El disco codificado al rotar, por el movimiento del eje, es leído por una cabeza estacionaria la cual convierte el movimiento giratorio del eje en un código digital.

#### **3.3.4.3            Interfase de operación**

Para la aplicación propuesta es recomendable que el operador pueda visualizar y cambiar los parámetros de acuerdo a las condiciones de molienda.

Para ese fin cuenta con una interfase de operación que le permite la posibilidad de manejar un menú de opciones en una pantalla con teclado integrado.

#### **3.3.4.4 Sistema ininterrumpido de potencia (UPS)**

Son sistemas de protección comunes en el suministro de energía eléctrica a equipos electrónicos, computadoras o redes informáticas.

El objetivo es que ante una falla de suministro eléctrico principal entreguen una alimentación alterna provista por medios de almacenamiento como capacitores o baterías, éstas últimas son las más comúnmente usadas.

Muchos de los sistemas electrónicos o programas corriendo en sistemas de procesamiento de información necesitan realizar un paro ordenado o una secuencia de pasos preestablecidos para garantizar el almacenaje y la seguridad de la información cuando haya una desenergización abrupta que pueda causar daños las tarjetas electrónicas o a las entradas y salidas. Un UPS provee tiempo de energía suficiente para poder realizar un paro normal ante una emergencia, evita la pérdida de información por fallas de energía y muchos de ellos ofrecen regulación de voltaje dentro de un porcentaje de variación en la entrada. Existen diferentes tipos de UPS, generalmente se clasifican en dos grandes grupos: el primer grupo es el llamado de reserva (stand by) que trabaja bajo el concepto de reacción, esto es, sensa el voltaje de línea y al momento de detectar una falta de energía, hace la transferencia hacia el banco de baterías, tienen el inconveniente que su tiempo de transferencia puede ser muy largo para equipos altamente sensibles.



El segundo grupo, continuos, trabajan continuamente sobre el banco de baterías el cual se encuentra permanentemente en proceso de recarga. Al detectar una falla solo pierde el circuito de carga, no existe tiempo de transferencia al banco de baterías y esto los hace muy robustos. Los continuos son mas caros que los de reserva por lo que se usan en sistemas que requieren alta seguridad y confiabilidad en la protección. En la aplicación propuesta este es el tipo de UPS requerido para la red de control, PLC y equipos de automatización.

### **3.4 Ventajas esperadas de la aplicación**

La instalación de una transmisión hidrostática debe tener beneficios económicos y de operación para que sea atractiva su aplicación. En los siguientes puntos se explican las principales ventajas que se pueden obtener.

#### **3.4.1 Ahorro de energía térmica**

Para determinar si existe un ahorro de energía térmica se usan los parámetros de operación tanto de la turbina del molino como de los turbogeneradores como punto de referencia de lo que se puede lograr.

Las turbinas instaladas operan con las siguientes condiciones: presión de vapor de 200 psig., temperatura del vapor 550 °F y una tasa de 52 libras de vapor / Kw. – hora.

Los turbogeneradores instalados operan con presión de vapor de 600 psig., temperatura del vapor 750 °F y una tasa de 18 a 22 libras de vapor / Kw. hora.

Con esas condiciones el vapor necesario para la demanda de 306 Kw. de la transmisión hidrostática en cada caso sería:

- a) para la turbina:  $306 \text{ Kw.} \times 52 \text{ lb. Vapor / Kw.} = 15912.0 \text{ lb. vapor}$
- b) para los turbogeneradores más ineficientes:

$$306 \text{ kW} \times 22 \text{ lbs. Vapor / Kw.} = 6732.0 \text{ lb. vapor}$$

La diferencia entre 15,912 lbs. de vapor y 6732 lbs. de vapor que es 9180 libras de vapor será el ahorro de energía térmica obtenido con la aplicación.

Ese vapor ahorrado al utilizarlo en un turbogenerador más eficiente por ejemplo el de 18 lbs. de vapor / Kw. nos permite generar 510 Kw – hora más de energía para vender a la red nacional. En una zafra de 150 días operando 24 horas diarias ese ahorro resulta ser un beneficio económico muy significativo para el ingenio.

### **3.4.2 Potencia adicional**

Además del beneficio económico ya mencionado, existe un beneficio para la operación pues la instalación de la transmisión hidrostática agrega la potencia adicional de 306 Kw. a la potencia actual del molino y permite reducir las cargas sobre las transmisiones actuales aumentando su vida útil. El beneficio se consigue porque el motor hidráulico va montado directamente en el eje de la maza y la porción de la potencia perdida en fricción en las coronas de las mazas superior y cañera se elimina ya que no es necesaria la corona en la maza cañera. También, con la opción de poder variar la velocidad de la maza cañera se puede buscar el punto de consumo mínimo de energía en la transmisión hidrostática ya que en ésta la potencia requerida es directamente proporcional a la velocidad lo que no ocurre en una turbina.

En una turbina el consumo de potencia es relativamente constante sin importar la velocidad del molino.

### **3.4.3 Aumento de la extracción de azúcar**

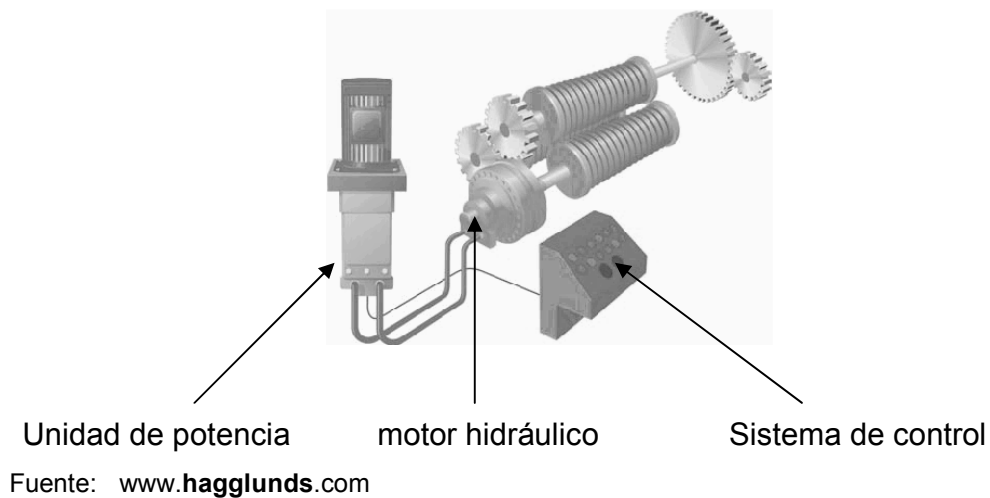
El objetivo primordial de los molinos es extraer la mayor cantidad posible del jugo de la caña. Una parte importante de ese objetivo depende de mantener una molienda uniforme y continua. Mediante el sistema de control se puede variar la velocidad desde cero hasta un valor deseado proporcionalmente a la velocidad de la maza superior en todo momento. Para cada aplicación se puede buscar la proporción de velocidad que optimice la operación de cada molino en particular. Teóricamente, con la velocidad de la maza cañera mas alta que la velocidad de la maza superior, se logra una alimentación muy uniforme que permite obtener mayor extracción.

De acuerdo a reportes de otros ingenio situados en otros países con la condición de velocidad de la maza cañera mayor que la velocidad de la maza superior, se ha conseguido un mejoramiento en la extracción del orden de 1%. Ese porcentaje de mejora puede significar entre 1.0 y 2.50 libras de azúcar más por tonelada de caña molida al final del proceso.

## 4. OPERACIÓN DE LA TRANSMISIÓN HIDROSTÁTICA EN MOLINOS CAÑEROS.

La operación de la transmisión hidrostática a utilizarse en esta aplicación es protegida y controlada desde unidades procesadoras de tipo electrónico. Un esquema simplificado de los componentes, unidad de potencia, motor hidráulico y sistema de control se muestra en la figura 42.

Figura 41. Componentes de la transmisión hidrostática



### 4.1 Sistema de protección y mando local

La transmisión hidrostática cuenta con un sistema electrónico dedicado a la regulación y monitoreo de las distintas variables que se necesitan para el correcto funcionamiento del equipo.

Estos equipos, como ya se mencionó anteriormente, son fabricados específicamente para este propósito y cuentan con la posibilidad de manejar toda la información y la habilidad de configuración que requiere la transmisión. Regularmente están compuestos por equipos fabricados en diferentes compañías y en base a una experiencia común se integran para la aplicación.

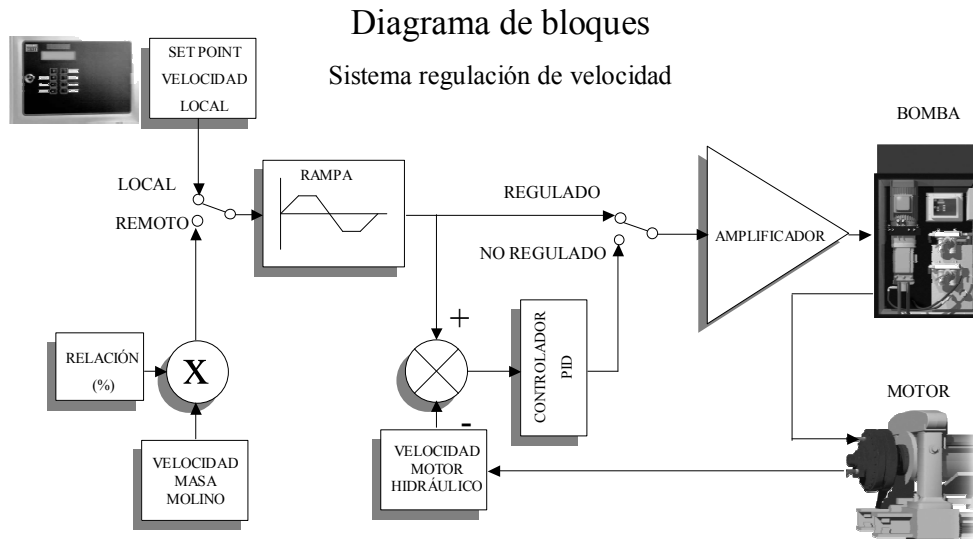
#### **4.1.1 Diagrama de bloques**

Una de las principales funciones del controlador electrónico es la regulación de velocidad. El procesador cuenta básicamente con tres funciones:

- Adquirir y acondicionar la señal (convertir la señal análoga a digital)
- Regular automáticamente con un algoritmo de control proporcional integral y derivativo (PID) o no regulación por seguimiento directo
- Acondicionar y convertir de digital a análoga la señal proporcional de salida hacia la bobina de control en la bomba hidráulica

A continuación en la figura 42, se presenta un diagrama de bloques bastante simplificado de las características elementales del controlador usado en la aplicación.

Figura 42. Diagrama de bloques simplificado del controlador



Fuente: [www.Hagglunds.com](http://www.Hagglunds.com)

#### 4.1.2 Funcionamiento general

La unidad de control esta basada en un microprocesador el cual se configura para adaptarse a la aplicación y está diseñado para poder manejar una o dos bombas trabajando interrelacionadas o independientemente. La unidad puede ser montada dentro del gabinete de la unidad de potencia o en un lugar diferente que facilite el acceso del operador. La unidad puede configurarse desde un teclado elemental de ocho botones en donde, por medio de una pantalla de dos líneas de texto, se selecciona cada una de las opciones de control (entradas / salidas, regulación, alarmas disparos , textos de alarmas, etc.).

El microprocesador puede monitorear la condición general del equipo por medio de *switches* instalados en los distintos puntos críticos del sistema y los presenta al operador con textos entendibles por ejemplo, bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, etc.

La unidad de control cuenta con la posibilidad de arrancar o parar el motor hidráulico, intercambiar la operación de local a remoto, ajustar el *setpoint* de velocidad aumentando o disminuyendo el porcentaje, intercambiar el sentido de rotación del motor y mantener la velocidad con el algoritmo de regulación o no regulación. También existe la definición de alarmas las cuales únicamente presenta en la pantalla para ser corregidas aún en funcionamiento. Si el valor prefijado de la variable se restablece deja de indicar la falla o alarma. Los disparos de protección con valor predefinido se configuran y al confirmarse el valor predefinido instantáneamente se produce un disparo inmediato o verifica durante un corto período de seguridad, que se definió anteriormente en el controlador, antes de hacer un disparo. Entre otras funciones está la llamada, limitación de potencia. Esta función es utilizada para proteger el motor hidráulico al ser sometido a torques muy altos.

El valor del torque se infiere de la presión de descarga de la bomba tomada por un sensor de presión que envía la corrección al regulador de velocidad y corrige con la velocidad hacia arriba o hacia abajo hasta restablecer un valor adecuado y seguro. Si no logra restablecerse en un valor seguro, el valor prefijado de disparo actúa y se efectúa de inmediato o con retardo.

### **4.1.3 Parametrización y configuración**

Como en cualquier sistema basado en un microprocesador para funcionar utiliza un programa que se encarga de manejar internamente el procesador. Regularmente el programa es mejorado y actualizado por el fabricante. En la versión para la propuesta en la aplicación, se puede contar con la posibilidad de tomar datos en milisegundos y almacenarlos en su memoria. Esta característica es muy importante para hacer chequeos de mantenimiento predictivo y correrlos por un cierto número de horas para tener la información en una computadora o descargarlos de los archivos cuando se necesite reemplazar o reparar la unidad.

A continuación se hace una descripción de las distintas ramas del menú de configuración, en donde se alimenta la información del sistema que manejará la unidad de control.

### **4.1.4 Mando de velocidad**

Una de las principales variables de la transmisión hidrostática es la variación de velocidad que se obtiene en la salida del motor hidráulico. Para hacer la medición del valor de la velocidad se utilizan medidores ópticos especiales que son conocidos industrialmente como Encoders, los cuales pueden presentar instantáneamente el valor de la velocidad de manera exacta. En términos básicos un encoder óptico consiste de un disco codificado con marcas impresas digitalmente que está acoplado a un eje.



El disco al rotar es leído por una cabeza estacionaria la cual convierte el movimiento giratorio del eje en un código digital, a la vez, el código digital es convertido a una señal de 4–20 miliamperios de uso estándar en los sistemas de automatización. En la figura 43 siguiente se muestra un encoder típico.

**Figura 43 Encoder**



Fuente: Catálogo **Hagglunds Drives**, Product manual marathon, p. 20.

Desde el punto de vista de la aplicación en el molino de caña, es necesario instalar un encoder directamente en el motor hidráulico y otro en el eje la maza superior o en el eje de la Catarina de donde se obtendrá la velocidad a la cual seguirá el motor hidráulico. El encoder montado en el motor hidráulico es necesario para poder operar bajo el regulador del controlador principal. La transmisión hidráulica puede trabajar sin esta medición directamente, sin embargo al existir torques aplicados al motor y se da una velocidad diferente a la esperada el sistema no lo reconocerá debido a la falta de retroalimentación de información al regulador.

Es necesario mantener la transmisión operando bajo condiciones óptimas desde el punto de vista mecánico y en base a esas condiciones se hace una clasificación de los distintos puntos de protección, regulación y confirmaciones de operación que provean la seguridad para las condiciones de operación que maximicen la eficiencia y la vida útil de la transmisión.

#### 4.1.5.1 Sensores de protección

**Alarmas y disparo por alta temperatura de aceite:** esta medición se encarga de activar la válvula de agua de enfriamiento al sistema, si no logra la temperatura ideal de operación, realiza un disparo total de la transmisión.

**Alarma y disparo de bajo nivel de aceite:** viene de un juego de flotes que se encuentran ubicados dentro del tanque de aceite.

La disminución del nivel de aceite activa una señal por medio de los flotes y avisa o dispara la transmisión.

**Bloqueo de filtros de retorno:** es un *switch* diferencial instalado en el filtro, indica cuando se encuentra sucio u obstruido impidiendo el paso de aceite que retorna al tanque, activa una señal de alarma o dispara la transmisión.

**Bloqueo de filtro de drenaje:** es un *switch* diferencial instalado en el filtro de drenaje, indica si se encuentra sucio u obstruido el paso de aceite de drenaje.

**Bloqueo del filtro de flushing de aceite:** es un switch diferencial instalado en el filtro de flushing, indica cuando esta sucio u obstruido el paso de aceite de flushing.

**Válvula de succión:** es un switch de límite, se encuentra instalado en la válvula de tal forma que indica si se encuentra cerrada o abierta la succión de la bomba hidráulica.

**Baja presión de carga:** es un switch de presión que se encarga de indicar al sistema cuando la presión de carga ha llegado a niveles muy bajos para la operación correcta de la bomba.

#### 4.1.5.2 Sensores de regulación

**Presión de trabajo:** utiliza un transmisor de presión proporcional para medir la presión de descarga de la bomba.

**Velocidad del motor:** utiliza un encoder óptico acoplado al motor hidráulico manejado por la unidad procesadora del motor hidráulico

**Velocidad externa:** utiliza un encoder óptico con un valor prefijado (set point) acoplado al eje de la maza o la catarina y es manejado por la unidad remota de control.

**Válvula proporcional:** maneja una señal configurable y manejada desde la unidad procesadora de la unidad hidráulica. Se encarga de regular el flujo de descarga en la bomba

**Válvula de agua de enfriamiento:** es una válvula de bola con actuador eléctrico y es manejada por la unidad procesadora de la unidad hidráulica y opera en función de la temperatura del aceite en el tanque.

#### 4.1.5.3 Confirmaciones y enclavamientos

El término confirmaciones se refiere a la operación en la cual se cierra un contactor principal y un contactor auxiliar, integrado en él, mecánicamente vuelve a cerrar para confirmar que el principal está cerrado. Un ejemplo, es cuando se arranca remotamente un equipo, el operador oprime un botón pero no puede ver si arrancó, el contactor auxiliar cierra su contacto y enciende un foco que confirma al operador que si cerró y que el equipo si arrancó.

Entre las principales confirmaciones se encuentran las siguientes,

**Motor hidráulico encendido:** es una señal que genera la unidad procesadora de control e indica que el motor hidráulico se encuentra habilitado para girar. El movimiento dependerá de este punto en delante de los enclavamientos externos (conductores entre molinos encendidos, paros de emergencia, etc.).

**Arranque / parada del motor hidráulico:** es la señal que el operador ha dado para arrancar y parar el motor hidráulico (no implica parar el motor eléctrico).

**Arranque / parada motor eléctrico:** es la señal que el operador ha dado para arrancar y parar el motor eléctrico )si se hace un paro del motor eléctrico automáticamente se bloquea el motor hidráulico.

**Reversa:** es generado por el operador e indica que se dio la orden de invertir la rotación. No siempre es permitido realizar esta operación en automático, debido a causas externas.

**Paro de emergencia:** esta señal es generada por el operador debido a una condición anormal, el paro dispara el motor eléctrico y bloquea el movimiento del motor hidráulico.

**Enclavamientos.** Un enclavamiento consiste en obligar a que se siga una secuencia lógica de operación preprogramada que se debe dar primero para pasar a la siguiente operación. Los enclavamientos son condiciones que deben cumplirse ya en operación los siguientes son ejemplo de ellos.

**Paro de emergencia:** esta señal es la que define la operación, es la que condiciona el arranque de la unidad.

**Falla general:** dentro de todas las variables que verifica la unidad controladora o el mando remoto se generan alarmas generales que son indicadas en el panel del operador (alta presión de descarga, paro de emergencia, falta de energía eléctrica, etc.) todas son condicionantes que provienen automáticamente del equipo no del operador.

**Motor eléctrico encendido:** es indispensable que el interruptor que alimenta energía eléctrica al motor se encuentre cerrado para que el sistema sepa que hay corriente. Esto se consigue con contactos eléctricos auxiliares cableados directamente al sistema.

**Motor hidráulico encendido:** es necesario contar con la habilitación de un contacto de salida del sistema de control para que se pueda iniciar la operación normal del motor hidráulico. Si hay alguna variable fuera de los límites no permitirá iniciar la operación aún con el motor eléctrico encendido.

Una vez se hayan cumplido con los requerimientos de protección se puede manejar la unidad remota o localmente y se pueden presentar todas las características del proceso en que se está operando.

## **4.2 Sistema de mando remoto**

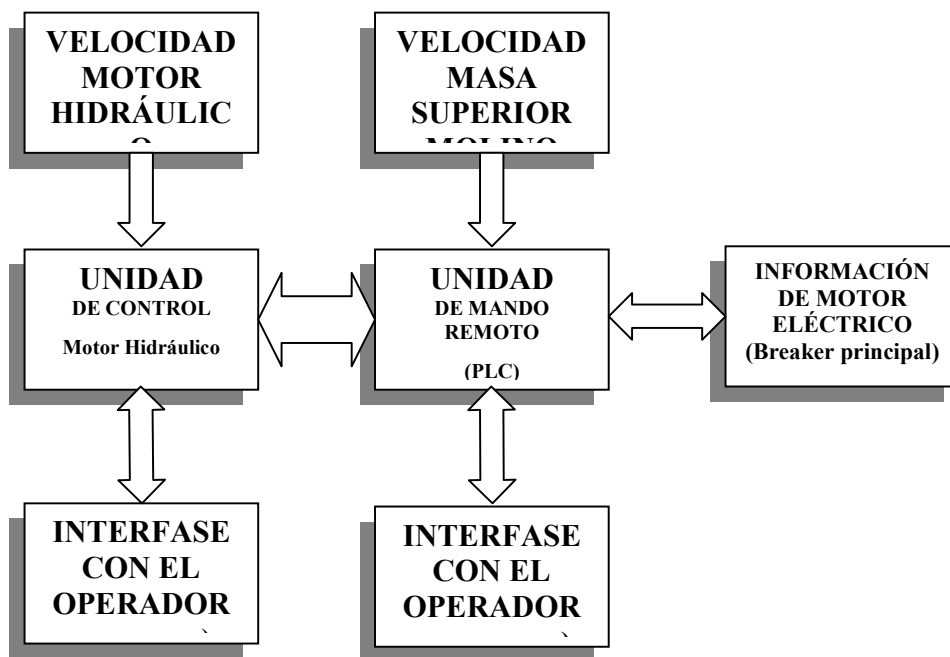
La transmisión hidrostática propuesta puede trabajar individualmente y manipulada por un operador que conozca el proceso. Sin embargo, existen en la aplicación condiciones que pueden cambiar muy rápido y es imposible que el operador pueda realizar correcciones. En la aplicación la integración de los controles hace que se requieran equipos de automatización adicionales como los que se mencionan en los puntos siguientes.

### **4.2.1 Estructura básica**

La unidad procesadora de control de la transmisión hidrostática tiene que estar relacionada a un controlador lógico programable (PLC) que se encuentra en el mando remoto. Usualmente se realizan cableados directamente de borne a bornes previamente definidos. Además se instalan pantallas industriales que sirven para observar la operación instantáneamente.

En la figura 44, se muestra en un diagrama la estructura básica del sistema de control.

Figura 44. Diagrama de bloques del sistema de control de un **molino cañero**



*Fuente:* [www.hagglunds.com](http://www.hagglunds.com)

#### 4.2.2 Funcionamiento general.

El funcionamiento ya en operación, consiste en que la maza cañera por medio del motor hidráulico siga de manera sincronizada el movimiento de la maza superior en forma proporcional al porcentaje de velocidad previamente fijado. Esto significa que, al empezar a moverse la maza superior también lo hace la maza cañera y mantiene su velocidad en la proporción por arriba o por abajo que se le haya asignado.

También se puede conseguir que la maza cañera gire independientemente de la maza superior cuando se requiera en casos especiales.

#### **4.2.3 Mando en condiciones de seguimiento de velocidad o presión**

Es necesario interrelacionar la unidad de potencia con el motor hidráulico y lograr el movimiento de la maza de acuerdo al movimiento del molino, por medio de la medición y control se logra un funcionamiento bastante confiable y seguro. Para lograr el seguimiento de la maza superior por el motor hidráulico es necesario contar con la velocidad instantánea de la maza superior e integrarla al control de seguimiento. La medición de la velocidad se consigue con la instalación de un medidor de velocidad tipo encoder en la salida del reductor de baja, la catarina en este caso, con el medidor se obtiene un set point de velocidad que es procesado en el algoritmo de control del mando remoto. La velocidad medida llega a una entrada análoga de un PLC y se puede procesar de varias formas de acuerdo al programador y requerimientos del proceso de molienda. Antes del control esta velocidad entra a un multiplicador estableciendo la condición de poder operar con un porcentaje por arriba o por debajo de la velocidad de la maza superior, este porcentaje es de  $\pm 30\%$ .

En la operación de seguimiento el controlador PLC remoto únicamente ve la velocidad del molino y se encarga de mantenerla constante e igual a la del *set point* (afectada por el diferencial prefijado) durante toda la operación.



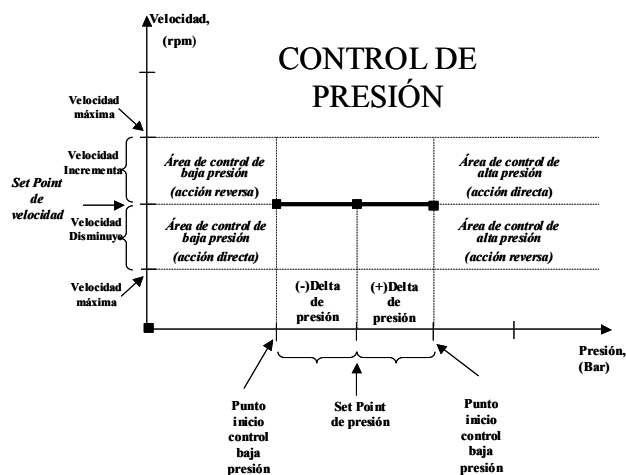
Cuando existen altos picos de torque entregados al molino (como ocurre en las sobrecargas), con el objeto de proteger la aplicación, es necesario entrar a un algoritmo de control que lo proteja.

Para esta operación se cuenta con un algoritmo de control que puede ser seleccionado por el operador y con el cual se definen ciertos rangos permitidos de presión.

En ciertos rangos de presión la velocidad puede ser constante, sin embargo, al salir de esos rangos puede disminuir o aumentar linealmente la velocidad hasta que la presión se encuentre dentro de la banda de seguridad prefijada para las características de la aplicación. Esta propiedad previamente programada nos asegura que bajo condiciones anormales de operación se proteja el equipo y aún se pare.

En la figura 45, se muestra una gráfica de la forma en que se opera y los parámetros que el usuario define para seguridad.

**Figura 45. Curva de control de presión**



#### 4.2.4 Interfase del mando remoto con el operador.

Como interfase se conoce al límite donde se da el contacto humano (operador) con la unidad de control.

Físicamente puede ser una pantalla o un teclado o ambos que mantiene al operador enterado de los parámetros de operación remota.

El controlador que lleva el programa de funcionamiento, verificación de variables, alarmas, etc. de modo remoto con el operador hace uso de una interfase integrada en un PLC. El PLC se usa conjuntamente con los encoder y un spider para operación remota. El spider es una caja que contiene un sistema de control con un software único, preprogramado y propio del fabricante de las transmisiones hidrostáticas para molinos cañeros. La figura 46, muestra una pantalla de interfase.

**Figura 46** Pantalla de interfase remota con el operador



Fuente: [www.hagglunds.com](http://www.hagglunds.com)

En funcionamiento remoto el PLC tiene diferentes propiedades. Una de ellas es la que le permite recibir información proveniente del encoder de la

catarina y mandarla al spider para que este mande a regular el caudal de la bomba hidráulica.

La regulación del caudal de la bomba varía la velocidad del motor hidráulico y el encoder montado en el eje de éste confirma al spider si se alcanzó o no el valor de velocidad deseado. Si no se alcanzó el valor, el spider corrige variando de nuevo el caudal y una vez corregido informa al PLC.

Toda la regulación y variación se corrige dentro de los valores preestablecidos de velocidad de 0 a 10%, y, de proporcionalidad entre 70% y 130% respecto de la velocidad de la maza superior.

La otra propiedad es la que permite que las variaciones de velocidad y de otras variables puedan visualizarse en pantallas que presentan la información en líneas de texto, gráficas o colores para que el operador este siempre con la operación bajo control. En la interfase con el fin de proteger la transmisión y para la operación se proveen grupos de niveles de acceso codificados para poder cambiarlos.

#### **4.2.5 Enlazamientos y alarmas colectivas**

El término enlazamiento se refiere a el enlace de señales desde el spider hasta la unidad remota, el spider le manda a hacer algo y la unidad lo ejecuta y confirma la ejecución. Los enlazamientos se utilizan en el sistema en las dos fuentes de generación de alarmas. La primera es la de la unidad de control local y la otra es el mando remoto. A cada fuente llegan cables de conexión con señales que las mantienen bajo supervisión. La unidad de control local cuenta con una pantalla de texto que muestra las alarmas o precauciones que son

locales en la transmisión , bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, alta presión de descarga, etc.

La segunda, el mando remoto, cuenta con una pantalla gráfica en la cual presenta cada uno de los eventos que se dan clasificados por hora. Entre los textos que presenta están: paro de emergencia activado, falla de arranque en motor eléctrico, falla de fuente de poder, falla colectiva del motor, etc.

En las alarmas obtenidas en la unidad de mando remoto existe un término utilizado para indicar que esta llegando de la unidad de control local y es: alarma colectiva, que significa que debe limpiarse localmente y al mando remoto únicamente se le confirmará automáticamente que ya se realizó la limpieza.

Una alarma colectiva puede ser producida por varias causas, bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, alta presión de descarga, etc. El mando remoto ante una alarma colectiva únicamente sirve para informar al operador que debe ir a verificar localmente, en el lugar, el sistema. Las alarmas pueden ser identificadas por el operador y atendidas con facilidad debido a que su descripción es claramente expuesta con textos.

Por la forma en que actúan sobre el sistema existen dos clasificaciones: alarma y precaución.

En el caso de las alarmas, el efecto producido inmediatamente es el disparo del motor hidráulico y el motor eléctrico, en ese orden. La precaución, se configura con un tiempo de retardo, generalmente de diez segundos, y transcurrido ese tiempo de precaución activada, se da un paro general.

## **5. CONTROLES PARA OPTIMIZAR SU FUNCIONAMIENTO**

La transmisión hidrostática propuesta por lo particular de la aplicación debe ser requerida en conjunto, como un sistema hidráulico para molinos de caña. El conjunto debe comprender la unidad de potencia, el motor hidráulico y el sistema de control.

Debe tener controles propios internos que le permitan funcionar adecuadamente y para optimizar su funcionamiento en el molino es necesario integrarlos con los controles externos específicos de la aplicación en el molino donde se usara. Todos los controles deben ser monitoreados en función de los rangos de las variables establecidas por el sistema de control que los procesa y almacena de manera que en cualquier momento se puedan consultar para analizar , registrar y mejorar el funcionamiento de la transmisión. Los controles específicos para la aplicación en la maza cañera deben ser establecidos en base a las condiciones de molienda por el ingenio y se deben integrar con los controles internos de la transmisión. Los controles específicos requeridos a la transmisión por las condiciones de molienda son:

- Control de seguimiento en modo sincronizado , este consiste en que la maza cañera debe seguir a la maza superior de forma proporcional en su velocidad.
- El control de seguimiento pueda variar en el rango de 70% al 130% de la maza superior.

- El control permita que la maza cañera empiece a girar al mismo tiempo que la superior, sincronización.
- El control de reversa, que permita girar la maza cañera en sentido opuesto a la rotación normal de trabajo
- El control que permite girar la maza cañera sin que este en movimiento la maza superior
- El control de velocidad máxima del motor hidráulico que permita instalar medidores con rango variable de velocidad en todo su rango.
- El control de arranque parada, que pueda hacerse manual e independientemente de modo local y remoto
- El control de la presión máxima de operación, que no permita que el motor hidráulico quede desprotegido frente a cargas muy altas.

### **5.1 Establecimiento de los rangos de las variables.**

Para lograr el funcionamiento y eficiencia óptimos en la transmisión hidrostática deben mantenerse las variables de operación dentro de los rangos para los cuales se especificó. Las principales variables son, presión velocidad y temperatura y todas deben estar ligadas al flujo de aceite y el agua de enfriamiento.

En las variables se observan los valores nominales de diseño y los de operación que deben estar dentro de los valores de diseño.

### 5.1.1 Velocidad

Para el motor hidráulico y la bomba los rangos de la velocidad de diseño y operación son los siguientes,

Motor Hidráulico : nominal de diseño ---- 0 ----- 10 rpm

de operación ----- 0 ----- 8 rpm

**Bomba hidráulica: de entrada -----1800 rpm**

de salida ----- variable

### 5.1.2 Presión

Para el motor y la bomba las condiciones de presión son las siguientes:

**Motor hidráulico: máxima 5,000 psig**

de carcaza máxima----- 43 psig

de carga ----- 22 - 225 psig

pérdidas de presión admisibles-- 0 - 14 psig

de trabajo ----- 2,500 - 3,000 psig

**Bomba hidráulica: máxima ----- 5,000 psig**

De carcaza nominal ----- 65 +/- 10 psig

**De carga nominal ----- 215 - 450 psig**

De carga operación ----- 320 psig

**De entrada ----- 225 - 275 psig**

De trabajo --- ----- 2,50 - 3,000 psig

### 5.1.3 Temperatura

Motor hidráulico:	Máxima -----	70 °C
	De operación -----	40 - 45 °C
	Alerta -----	65 °C
	Arranque -----	40 °C

La temperatura de alerta (65 °C) es prefijada, cuando se llega a ese valor la unidad avisa para que se tomen acciones, si no se hace nada y llega a máxima (70°C) la unidad se dispara por temperatura. La temperatura de arranque (40°) en este sistema es la temperatura que se recomienda esté el aceite antes de ponerle carga a la unidad. Esta temperatura se logra recirculando el aceite antes de meter carga.

### 5.1.4 Agua de enfriamiento

#### Para toda la transmisión, motor y bomba

Temperatura -----	30 °C
Presión mínima -----	52 psig.
Flujo mínimo -----	200 litros / minuto.

### 5.1.5 Fluido

Aceite hidráulico ISO V.G. 150	
Presión máxima -----	5,000 psig.
<b>Flujo -----</b>	<b>238 gpm.</b>



## **5.2 Monitoreo de una característica de calidad**

### **5.2.1 Definición de la característica**

Una característica de calidad importante que sirve para determinar que tan eficiente es el proceso de molienda es el pol del bagazo. El bagazo es el residuo que se obtiene al moler caña de azúcar en los molinos y generalmente el término bagazo está referido al que sale del último molino. El bagazo al salir del molino aun contiene sacarosa. La sacarosa en la caña es el compuesto químico puro llamado también azúcar de caña.

Analizar el contenido de azúcar en el bagazo requiere de equipos especiales y demasiado tiempo lo que hace el análisis impráctico para tomar acciones correctivas durante el proceso. Debido a lo anterior el análisis que se hace es de sacarosa aparente. La sacarosa aparente se determina por polarimetría con un aparato llamado polarímetro. El resultado del análisis, sacarosa aparente, es lo que se conoce como pol.

De acuerdo a las normas ICUMSA, que son las que rigen internacionalmente en los ingenios, para fines de cálculo se puede usar el término pol siempre que en el resultado aparezca la palabra pol. La ventaja del análisis de pol es que los resultados se obtienen relativamente fácil y lo más importante, rápidamente. La rapidez permite usar los resultados del análisis para corregir y mejorar el proceso de molienda.

## 5.2.2 Variaciones de velocidad en la transmisión hidrostática buscando mejorar la característica de calidad

Una de las ventajas en el molino que tiene la transmisión hidrostática propuesta es que permite variar la velocidad de la maza cañera proporcionalmente a la velocidad de la maza superior. Esa ventaja puede usarse para analizar en cual valor de velocidad la maza cañera contribuye a mejorar la característica, pol del bagazo. En casi todos los ingenios se acostumbra llevar un control estadístico del pol del bagazo con límites de control basados en la desviación estándar y el promedio. Esos dos estadísticos por si solos no son suficientes para saber si el proceso se puede mejorar o no. Para determinar el potencial que tiene el proceso de mejorarse se puede utilizar la técnica estadística conocida como Capacidad del proceso.

La técnica capacidad del proceso<sup>4</sup> permite averiguar si el proceso puede cumplir con entregar una característica que permita cumplir con los parámetros prefijados. Además, por los datos que se requieren para su cálculo la capacidad del proceso es sencilla y rápida de calcular lo cual la hace sumamente útil para tomar acciones sobre la característica y corregir el proceso para mejorarla si es posible.

Con el empleo de esta técnica para determinar estadísticamente que tan capaz es el proceso, se utiliza la desviación estándar multiplicada por seis, lo que nos da el estadístico  $6\sigma$ . Se utiliza este estadístico ya que el 99.73% del valor de la característica pol del bagazo, estará dentro de ese rango.

---

4 **José F. Cano**, Analizando la capacidad del proceso: color peso y vitamina A en el azúcar

blanco estándar de ingenio La Unión, S.A.-Guatemala, Memorias ATACA 2002, pagina 250.

El estadístico  $6\sigma$  que también es conocido como la tolerancia natural del proceso, se compara contra el rango dado por los límites de especificación, superior (Ls) e inferior (Li). Mientras mas bajo sea el valor de  $6\sigma$  con relación a Ls y Li más capaz será el proceso.

Para utilizar la técnica se pueden hacer corridas y sacar datos en diferentes valores de velocidad de la maza cañera y los resultados analizarlos para determinar en que velocidad hubo mejoría. Los datos que se necesitan son, límites de especificación, promedio y desviación estándar de las muestras, la velocidad en que estaba el hidráulico en cada corrida y las fórmulas de los índices de capacidad del proceso y sus cálculos. Los límites de especificación se escogen entre los valores de pol del bagazo entre los cuales se quiere medir y son decididos en base a datos históricos del pol del bagazo del ingenio o referenciados a los valores que han obtenido otros ingenios con mejor desempeño en la industria. El promedio y la desviación estándar se calculan de los valores registrados en el laboratorio del ingenio.

En los ingenios se acostumbra tomar seis u ocho muestras diarias de bagazo y a cada una se le analiza el pol del bagazo o sea que los datos están disponibles y no se requiere trabajo extra. Considerando que el tamaño de muestra mínimo recomendado para estimar la capacidad del proceso es de treinta datos, se pueden tomar los ocho datos de cinco días, lo cual daría cuarenta datos, y establecer para cada corrida un valor de velocidad para cada corrida. Para el análisis se puede partir de cuando la velocidad de la maza cañera es igual a la velocidad de la maza superior y luego hacer corridas en velocidades prefijadas dentro del rango que permite la transmisión hidrostática.

Por ejemplo, se puede variar la velocidad en porcentajes de 5, 10, 15, etc. por arriba de la velocidad de la superior y para cada porcentaje hacer un análisis de capacidad. Las formulas de la técnica estadística Capacidad del Proceso<sup>5</sup> abarcan los siguientes límites e índices:

Ls = límite de especificación superior, valor decidido y asignado, según criterio adoptado

Li = límite de especificación inferior, valor decidido y asignado según criterio adoptado

$6\sigma$  = tolerancia natural del proceso

Cp = índice de potencial de capacidad del proceso

Cpi, Cps, Cpk = índices de centrado del proceso, se utilizan para saber si el proceso está correctamente centrado

Entre los diferentes índices existen relaciones y valores recomendados en base a la experiencia de especialistas en estadística que los han utilizado en estudios prácticos y han determinado que esos valores tienen la validez suficiente para los análisis. Las fórmulas a utilizar son las siguientes:

$CP = (Ls - Li) / 6\sigma$  ; el valor mínimo que se sugiere es 1.33; esto significa que por debajo de 1.33 el proceso tiene potencial bajo de cumplir con las especificaciones deseadas.

$Cpi = (X - Li) / 3\sigma$ , indica que el proceso está centrado hacia el lado de Li.

$Cps = (Ls - X) / 3\sigma$ , indica que el proceso está centrado hacia el lado de Ls.

$Cpk = \text{mínimo}(Cpi, Cps)$ , indica que el menor valor entre Cpi y Cps es el que se acepta como el estimado del centrado del proceso. La meta del Cpk debe ser 1, lo que indica que el proceso está centrado correctamente.

---

<sup>5</sup> **Grant, Eugene L. Ad R.S, Leavenworth,** Statistical Quality Control, 6<sup>th</sup> edition, p. 156 –173 Mc Graw – Hill, Inc., 1988

Para llevar a cabo un monitoreo del pol del bagazo en el proceso de molienda se puede hacer con los datos obtenidos del bagazo en la salida del molino en estudio. Para efectos de ilustración del uso de las fórmulas y su significado se hará un análisis de capacidad del proceso en el bagazo del último molino utilizando los datos obtenidos en dos períodos de cinco días cada uno en una zafra anterior. Para el ejemplo, se asume que el primer período es con la velocidad de la maza cañera igual a la velocidad de la maza superior y, en el segundo período la maza cañera tiene 10% de velocidad arriba de la superior. El análisis del primer período ( $\sigma$ ) se hace bajo las siguientes condiciones,

- se asignan los límites de especificación,  $L_s = 2.25$  y  $L_i = 1.50$
- se toman 8 muestras diarias durante cinco días, esto suma 40 datos
- de los 40 datos se calcula,  $\bar{X} = 1.606787$  y  $\sigma = 0.145446$
- se asume, para el ejemplo, velocidad de la maza cañera = velocidad de la maza superior.

Cálculos:

$$C_{pi}^{\sigma} = (\bar{X} - L_i) / 3\sigma = (1.606787 - 1.50) / 3 \times 0.145446 = 0.2447$$

$$C_{ps}^{\sigma} = (L_s - \bar{X}) / 3\sigma = (2.25 - 1.606787) / 3 \times 0.145446 = 1.4741$$

$$C_{pk}^{\sigma} = \text{mínimo } (C_{pi}^{\sigma}, C_{ps}^{\sigma}) = \text{mínimo } (0.2447, 1.4741) = 0.2447$$

$$CP^{\sigma} = (L_s - L_i) / 6\sigma = (2.25 - 1.50) / 6 \times 0.145446 = 0.8594$$

Para el análisis del segundo período se mantienen los límites  $L_s = 2.25$  y  $L_i = 1.50$ . Se toma la misma cantidad de muestras, 40, y se calcula  $\bar{X} = 1.6115$  y  $\sigma = 0.124624$ , entonces,

$$C_{pi} = (1.6115 - 1.50) / 3 \times 0.124624 = 0.2982$$

$$C_{ps} = (2.25 - 1.6115) / 3 \times 0.124624 = 1.7078$$

$$C_{pk} = \text{mínimo } (0.2982, 1.7078) = 0.2982$$

$$CP = (2.25 - 1.5) / 6 \times 0.124624 = 1.0030$$

En base a los cálculos anteriores, partiendo de que todas las demás variables que puedan influir en el pol del bagazo se mantuvieron constantes en las dos corridas, se puede inferir que la segunda corrida, con la velocidad de la maza cañera más alta que la superior, presenta un mayor potencial de mejora puesto que  $CP > CP^o$  a pesar de estar debajo del valor mínimo. Podría pensarse que con una velocidad mayor del 10% esta situación mejore. También,  $Cpk > Cpk^o$  indica mejora ya que la meta del índice  $Cpk$  es 1 y  $Cpk$  se aproxima más.

Con los datos usados en el ejemplo, se puede considerar una alternativa, si se sube la velocidad y  $CP$  mejora pero a la vez  $Cpk$  es más bajo, se puede desprestigiar el centrado para tender al límite inferior o se puede mejorar también el centrado para lograr un control completo y constante en el proceso. Como se mencionó, la técnica capacidad del proceso es una herramienta que ayuda en el control del proceso pero no es la única. Si se quiere analizar más de una variable a la vez, de las que influyen en el pol del bagazo, se pueden utilizar técnicas más complejas que demandan más tiempo de análisis, más datos de las otras variables tomados al mismo tiempo y relacionarlos con la velocidad del hidráulico.

Esas técnicas son conocidas como, técnica de control de calidad fuera de línea y la más poderosa, diseño de experimentos; y requieren de una persona especializada en el tema para su implementación.

### 5.2.3 Importancia económica del mejoramiento de la característica

La característica pol del bagazo representa una de las mayores pérdidas en un ingenio y es la más importante en el proceso de molienda. El pol del bagazo como ya se mencionó, no es más que el azúcar que se va en el bagazo y que se pierde al enviarlo a las calderas. Además de ser azúcar que no se recupera, en las calderas su presencia es un problema ya que el azúcar a alta temperatura se carameliza, se adhiere a las paredes de los tubos y disminuye la capacidad de transferencia de calor de la caldera. La magnitud de su importancia en la economía de un ingenio se puede visualizar en el siguiente ejemplo.

Suponiendo que se tiene un pol del bagazo de 2.25% y se logra bajar a 2.10% en un ingenio que muele 12,000 toneladas de caña al día y que el bagazo representa 26% de la caña (este valor es bastante común) la ganancia por esa disminución se calcula a continuación.

Bagazo en caña ( Toneladas / día) = caña molida (toneladas /día) X % bagazo en caña

$$= 12,000 \times 0.26$$

$$= 3,120 \text{ toneladas de bagazo / día}$$

Para el caso de pol del bagazo de 2.25%

Pol en bagazo (ton./día) = bagazo en caña (ton./día ) x % pol del bagazo

$$= 3120 \text{ (ton./día) } \times 2.25\%$$

$$= 70.20 \text{ toneladas de pol (azúcar) /día.}$$

Para el caso de pol del bagazo de 2.10% se tiene,

$$\text{Pol en bagazo (ton./día) = 3,120(ton./d} \times 2.10\%$$

= 65.52 toneladas de pol (azúcar)/ día.

La diferencia ( 70.20 – 65.52) , 4.68 toneladas de pol /día es la cantidad que se recuperaría al bajar 0.15%, (2.25% – 2.10%) el pol del bagazo. Esas 4.68 toneladas pol / día en una zafra normal de 150 días de operación representan, (4.68 x 150) 702 toneladas de pol de las cuales la fábrica recupera aproximadamente el 80% al final del proceso.

Usando la tonelada corta de 2000 libras y el quintal de 100 libras, las 702 toneladas equivalen a 14,044 quintales. Asumiendo un valor a precio de mercado mundial de \$8.00 /quintal y el 80% que recupera el ingenio se tiene  $14,044qq \times 0.80 \times \$8.00/qq = \$ 89,881.6$  de ingreso extra al ingenio por mejorar la característica de calidad, pol del bagazo. Si el pol del bagazo se pudiera bajar de 2.25% a 1.80% el ingreso casi se triplica, \$ 269,583.

El ejemplo anterior demuestra claramente la importancia económica de la característica de calidad, pol del bagazo, para un ingenio.

Las técnicas estadísticas pueden usarse conjuntamente con herramientas, equipos y recurso humano para mejorar el proceso y obtener ganancias.

### **5.3 Definición de otras características de calidad por su importancia económica**

Las características que se definirán posteriormente están relacionadas con los molinos y pueden ser mejoradas con el uso de la transmisión hidrostática en busca de lograr beneficios económicos.



### 5.3.1 Humedad en el bagazo de caña

La humedad en el bagazo de la caña es el contenido de agua que aun lleva después de pasar por los molinos. El contenido de humedad depende en parte de la preparación de la caña y en mayor proporción de la extracción lograda en los molinos. Los valores típicos de humedad en el bagazo varían entre 48% y 53%. En los ingenios es rutina diaria hacer varios análisis de humedad a muestras de bagazo y se hacen grandes esfuerzos para reducirla.

Todos los esfuerzos van encaminados a bajar la humedad para mantener o mejorar la eficiencia de las calderas. Estudios realizados en diversos países han determinado que cada punto de humedad que se logre bajar equivale a aproximadamente 0.60 puntos de aumento en la eficiencia de las calderas. También, el bagazo con menos humedad permite disminuir el exceso de aire necesario para la combustión, reduce la tasa de flujo de gases a través del hogar, lo cual disminuye la potencia requerida por los ventiladores y aumenta la vida útil de las calderas. Aparte de esos beneficios en la operación, existe un beneficio extra en la generación de electricidad con bagazo. En la actualidad para los ingenios que generan electricidad para venderla a la red nacional el beneficio económico por bajar la humedad se traduce en vender más energía por bagazo o en no gastar en combustibles alternos. La importancia económica de bajar el valor de la característica, humedad del bagazo, se puede visualizar en el siguiente ejemplo.

Suponiendo que un ingenio muele 12,000 toneladas de caña/día con un 26% de bagazo en caña, pol de bagazo de 2.25% y que logra bajar la humedad 0.50 puntos, desde 50% hasta 49.5% y la duración de la zafra es de 150 días, el ahorro de bagazo o ganancia de energía se calcula como sigue:

### Fórmulas

Bagazo producido (toneladas /día) = caña molida (toneladas /día) x % bagazo en caña.

Poder calorífico neto del bagazo (Btu / libra de bagazo) = PCNB

$$PCNB = 7650 - 21.6P - 87.3H \text{ Btu / libra de bagazo}$$

En donde: P = pol del bagazo

H = humedad del bagazo.

### Cálculos

$$\begin{aligned} \text{Bagazo producido (toneladas / día)} &= 12,000 \text{ toneladas de caña/ día} \times 26\% \\ &\text{bagazo/ caña} \\ &= 3120 \text{ toneladas de bagazo} \end{aligned}$$

Poder calorífico neto del bagazo, PCNB; para 50% de humedad:

$$\begin{aligned} \text{PCNB (Btu / libra de bagazo)} &= 7650 - 21.6 \times 2.25 - 87.3 \times 50 \\ &= 3236.40 \text{ Btu / libra de bagazo} \end{aligned}$$

Poder calorífico neto del bagazo, PCNB, para 49.5% de humedad:

$$\begin{aligned} \text{PCNB (Btu / libra de bagazo)} &= 7650 - 21.6 \times 2.25 - 87.3 \times 49.5 \\ &= 3280.05 \text{ Btu / libra de bagazo} \end{aligned}$$

Ganancia de bajar 0.5 puntos la humedad,  $3280.05 - 3236.40 = 43.65$  Btu /libra de bagazo

Sabiendo que 1 tonelada = 2,000 libras, el bagazo producido en libras es, 3120 toneladas x 2,000 libras /tonelada = 6 240,000 libras, y 1kBtu = 1000 Btu.,

$$\begin{aligned} \text{Ganancia equivalente en energía} &= 6\,240,000 \text{ libras bagazo / día} \times 43.65 \\ &\text{Btu / libras de bagazo} \\ &= 272,376 \text{ kBtu / día} \end{aligned}$$

Con el poder calorífico de 3280.05 Btu / libra de bagazo (3.28005 kBtu / libra de bagazo) , el bagazo ahorrado en un día es,

$$\begin{aligned}\text{Bagazo ahorrado} &= 272,376 \text{ kBtu / día} / 3.28005 \text{ kBtu / libra de bagazo} \\ &= 83,040.20 \text{ libras de bagazo / día.} \\ &= 41.52 \text{ toneladas de bagazo / día}\end{aligned}$$

En la zafra de 150 días el total de bagazo ahorrado será igual a  
 $150 \times 41.52 = 6228.02$  toneladas de bagazo.

El equivalente de ese bagazo en bunker u otro combustible significa un beneficio económico importante visto como ahorro o como ingreso para el ingenio.

### **5.3.2 Agua de imbibición**

La imbibición por definición es el proceso que consiste en aplicar agua o jugo al bagazo a la salida de cada molino. Si se aplica agua al bagazo que sale del penúltimo molino (el que va a entrar al último molino), el jugo que sale del último molino se aplica al bagazo que va entrando al penúltimo molino y el jugo del penúltimo molino al bagazo del molino anterior y así sucesivamente, el proceso se llama imbibición compuesta y al agua aplicada en la entrada del último molino se le llama agua de imbibición. El agua de imbibición permite aumentar la extracción de azúcar en los molinos.

El agua de imbibición se recomienda que sea caliente alrededor de los 160 °F y el flujo en proporción a la molienda. Existen dos formas de reportar la cantidad de agua de imbibición aplicada, la primera referida a la caña molida se conoce como imbibición % caña y la otra referida al contenido de fibra, imbibición % fibra. La imbibición % caña varía entre 20% y 30% y la imbibición % fibra entre 160% y 250%.

Existe un límite práctico para cada ingenio en cuanto a la cantidad de agua de imbibición a aplicar, el límite por una parte lo establece la capacidad de evaporación posterior, en la estación de evaporadores y por otra parte, el contenido de humedad en el bagazo que puedan manejar las calderas. En los ingenios se llevan registros diarios de la cantidad de agua que se aplica horariamente y esa cantidad puede variarse fácilmente en cualquier momento. Para determinar si la transmisión hidrostática ayuda a encontrar el valor óptimo de agua a aplicar, se pueden hacer varios análisis, algunos podrían hacerse manteniendo fija la temperatura y la cantidad de agua y variar la velocidad de la maza cañera. Otros análisis con diferentes valores prefijados de agua, manteniendo constante la temperatura y variar la velocidad de la maza cañera.

Para efectos económicos se puede señalar que, estudios realizados han determinado que aumentar un punto en el agua de imbibición %fibra puede significar un aumento de 0.01 puntos en la extracción.

Un ingenio moliendo 12,000 toneladas de caña al día con mejorar en 0.01 su extracción con la misma calidad de caña puede obtener de 1,500 a 2,000 quintales de azúcar extra.

## CONCLUSIONES

1. Las transmisiones hidrostáticas diseñadas específicamente para molinos cañeros son una alternativa confiable para sustituir parcial o totalmente las transmisiones tradicionales de los molinos cañeros.
2. Los trabajos de adecuación de los ejes de las mazas para montar las transmisiones hidrostáticas se pueden hacer sin problemas en la época de no zafra.
3. Suministrar la energía eléctrica al motor eléctrico de la transmisión por medio de un turbogenerador significa un ahorro del 60 % en libras de vapor por kilowatt.
4. La transmisión hidrostática permite variar la velocidad de la maza del molino donde se aplica lo que permite buscar la velocidad óptima de operación de la maza.
5. La transmisión hidrostática en el molino permite hacer análisis a diferentes valores de velocidad para mejorar las características de calidad en el molino.

6. Los sistemas de control de la transmisión hidrostática enlazados con las variables de operación del molino permiten obtener datos exactos y confiables de las condiciones de operación de los molinos y esos datos pueden utilizarse para tomar decisiones de carácter económico.
7. La implementación de las transmisiones hidrostáticas en los molinos se puede hacer gradualmente, esto es, reponer molino por molino y luego el molino completo si es necesario.
8. Las transmisiones hidrostáticas utilizan bombas y motores hidráulicos de desplazamiento variable.
9. Utilizar la transmisión hidrostática en la maza cañera del molino permite una alimentación uniforme de caña al molino.

## RECOMENDACIONES

1. Para aplicar una transmisión en un molino, previamente debe decidirse el voltaje y la línea de la red eléctrica del ingenio donde se va a conectar ya que es necesario que la línea sea robusta y estable para no afectar el sistema.
2. La sección de los ejes de las mazas donde va montado el motor hidráulico deben dimensionarse dentro de las tolerancias, el acabado y la dureza exigidas por fabricante de la transmisión para que el anillo de desgaste no se pegue al eje.
3. Se puede utilizar la técnica estadística Capacidad del Proceso para evaluar, a diferentes velocidades y manteniendo fijos los valores de otras variables, el comportamiento de otras características de calidad.
4. Para evaluar una característica de calidad variando la velocidad y otras variables, es necesario utilizar técnicas estadísticas más avanzadas como Diseño de Experimentos y Control de Procesos en Línea.
5. Utilizar este trabajo de graduación como material de apoyo en cursos relacionados con procesos de manufactura e hidráulica, en la carrera de ingeniería mecánica industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Evans James R. ***The Management and Control of Quality***. Second Edition: USA West Publishing Company. 1993. 700 p.p.
2. De Laval. ***Engineering Handbook***. Third Edition USA: Mc Graw Hill Book Company. 1970. 160 p.p.
3. Grant Eugene L. , Leavenworth Richard S. ***Statistical Quality Control***. Sixth Edition USA: RR Donnelley & Sons Company 1988. 714 p.p.
4. Green Robert E. ***Machinery's Handbook***. Twenty–Fifth Edition Usa: Industrial Press Inc. 1996. 2547 p.p.
5. Hugot E. ***Handbook of Cane Sugar Engineering***. Third, Completely Revised, Edition Amsterdam: Elsevier. 1986. 1166 p.p.
6. Meade George P. ***Manual del azúcar de caña***. Traducción de la novena edición en inglés, España: Montaner y Simon S.A. 1967. 940 p.p.
7. Parker Hannifin Corp. ***Industrial Hydraulic Technology***. Bulletin N° 0232 – B1. Second Edition USA: Fluid Power Training Dept. 1993. 150 p.p.
8. Sundstrand Sauer. ***Heavy Duty Transmissions***. Bulletin 9660. Revision A USA Sales Department. 1975. 65 p.p.







