

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**DISEÑO DE LA SECCIÓN DE MOLIENDA DE UNA PLANTA
CONCENTRADORA DE MINERAL DE COBRE, PARA UNA
CAPACIDAD DE 1200 TMD**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO**

CARLOS OLIVA GUEVARA

PROMOCION 2001 – I

LIMA – PERU

2015

CONTENIDO:

PRÓLOGO

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA
3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS
4. COSTOS

CONCLUSIONES Y RECOMENACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS Y PLANOS

AGRADECIMIENTO

En principio a DIOS por haberme dado salud, capacidad y sabiduría para culminar mis estudios y realizar este trabajo.

A mi alma mater LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA por haber sido la formadora de mis conocimientos éticos, morales y profesionales.

A mi asesor el Ing. Fortunato Alva Dávila, quien con su entereza dedicación me ayudó a sacar este proyecto adelante.

A todas las personas, tanto de la universidad como fuera de ella, que de una u otra manera tuvieron la gentileza de apoyarme incondicionalmente a cumplir uno de mis sueños.

De todo corazón mil gracias.

DEDICATORIA

A mis amados progenitores Adela y Virgilio, dignos de respeto, amor y dechados de imitación, quienes se sintieron siempre muy orgullosos y felices con mi ingreso a esta casa de estudios y que hoy desde el cielo siguen guiando e iluminando mis pasos.

A mis hermanas, hermanos, cuñadas, cuñados y mi familia en pleno que siempre estuvieron pendientes y alentándome en todo momento en mi vida profesional.

A mi querida y adorada esposa Raquel compañera de mis nuevos logros y retos.

INDICE

	Pág.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA.....	I
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	I
TESIS.....	I
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:.....	I
INGENIERO MECANICO.....	I
LIMA – PERU.....	I
2015	I
CONTENIDO	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA	III
INDICE.....	IV
PROLOGO	1
CAPITULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4 ALCANCE.....	4
1.5 LIMITACIONES	5
CAPITULO 2.....	6
DESCRIPCION DE LA PLANTA	6
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL	6
2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA PLANTA CONCENTRADORA.....	11
2.3 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN MOLIENDA	11
2.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO	13
2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	13
2.6 DISPOSICIÓN DE LA PLANTA.....	20

CAPITULO 3.....	21
DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS	21
3.1 CRITERIOS DE DISEÑO.....	21
3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO	22
3.3 PARÁMETROS PARA DISEÑO	45
3.4 DISTRIBUCIÓN DE LA MOLIENDA	45
3.5 MOLINO DE BARRAS	46
3.6 MOLINO DE BOLAS	59
3.7 ZARANDA DE ALTA FRECUENCIA.....	73
3.8 SISTEMA DE BOMBEO DE PULPA	75
CAPITULO 4.....	83
COSTOS	83
4.1 COSTOS DE EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS Y PLANOS.....	89

PRÓLOGO

La presente tesis de competencia profesional consiste en diseñar la sección de molienda de una planta concentradora de mineral de cobre de 1200 TMD de capacidad.

En el capítulo I, se presentan los antecedentes del proyecto, se señala el objetivo, se identifican los problemas, el alcance y las limitaciones de esta tesis.

En el capítulo II, se describen las características del mineral, se describe el proceso de la planta y de la sección de molienda, se muestra el diagrama de flujo y se describen los principales equipos de la sección de molienda.

En el capítulo III, se presenta la metodología de diseño y se calculan las potencias y velocidades de los molinos. Se determinan las relaciones de velocidades de los molinos y los reductores de velocidad que permiten girar a los molinos a velocidades adecuadas, se diseñan los engranajes de tipo cilíndricos de dientes helicoidales, se seleccionan el reductor de velocidad y el motor eléctrico. Se selecciona la zaranda, se dimensiona el tanque estabilizador y el tanque de succión, se calcula la potencia de la bomba de pulpas. Se selecciona cada uno de estos equipos.

En el capítulo IV, se presentan los costos de inversión del diseño considerando solo el equipamiento mecánico y electromecánico para los equipos descritos en el capítulo II

Finalmente se culmina con las conclusiones y recomendaciones del trabajo, presentando también planos, catálogos y anexos diversos que han servido de guía para el desarrollo de la tesis.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En los últimos diez años la actividad minera ha cobrado gran importancia económica para el país, esta representa más del 50% de las divisas, el 20% de la recaudación fiscal y el 11% del PBI. Solo el cobre totaliza el 29% de las exportaciones mineras; por lo que actualmente existe una gran expansión de esta actividad dentro de la que se incluye la gran minería, mediana, pequeña y la minería informal.

Se está desarrollando nuevos proyectos con inversiones importantes para los próximos años. También, en este marco de referencia muchas empresas mineras están ampliando sus inversiones, por lo que se espera que el Perú en el 2016 sea el segundo productor de cobre en el mundo con 2.5 millones de TMA solo por debajo de Chile quien tiene una producción de 5.5 millones de TMA.

Entre las minas de cobre más importantes en nuestro país tenemos: Antamina ubicado en el Callejón de Conchucos provincia de Huari, departamento de Ancash, Cuajones en Moquegua, Toquepala en Tacna, Tintaya en Cuzco, Cerro verde en Arequipa, Condestable en Mala Cañete, etc.

Como antecedentes académicos para el desarrollo de la tesis puedo afirmar que existe material de referencia con trabajos desarrollados similares de tesis de grado, tesis doctorales, investigaciones referentes al cobre, catálogos, etc. tanto a nivel local, nacional e internacional.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo del estudio es diseñar la sección de molienda de una planta concentradora de mineral de cobre, para una capacidad de procesamiento de 1200 TMD. Para ello debemos de calcular, diseñar y seleccionar los principales equipos mecánicos y las instalaciones necesarias para la operación de la misma.

1.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se identifica como problema la coordinación de las dimensiones de los molinos y las relaciones de transmisión con los equipos motorizados.

También se identifica como problema el cálculo, y selección de las bombas de pulpa, la zaranda, los motores eléctricos, el diseño del tanque de succión, del tanque estabilizador, de la tubería y además la mejor disposición de los equipos en la sección molienda.

1.4 ALCANCE

En el proyecto se incluyen:

- La molienda primaria con molino de barras, molienda secundaria con molino de bolas y la clasificación con zarandas vibratorias de alta frecuencia..

- El cálculo y selección de los equipos mecánicos, comprende el molino de barras, el molino de bolas, los reductores de velocidad, el tanque estabilizador, la zaranda y las bombas de pulpas.
- El cálculo y selección de los equipos eléctricos, comprende a los motores del molino de barras y del molino de bolas.
- El cálculo físico y químico para la selección de los equipos hidráulicos específicamente tuberías.
- La mejor disposición de los equipos de la sección molienda.

1.5 LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones de esta tesis podemos citar lo siguiente:

- No se incluyen las cimentaciones de las máquinas
- No se incluyen las dimensiones ni obras civiles.
- No se consideran las instalaciones eléctricas del resto de la planta
- No se incluyen la selección de los tipos de fajas de transporte.
- No se incluyen las relaciones con otras secciones de la planta.
- No se incluyen los costos de cimentaciones ni obras civiles
- No se incluyen los costos de instalaciones.

CAPITULO 2

DESCRIPCION DE LA PLANTA

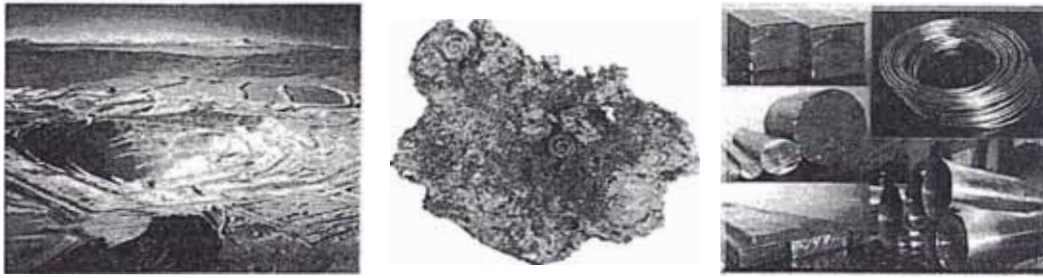
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL

Mineral	Cobre
Densidad	2,1 t/m ³

El cobre es un metal de color rojizo que se puede encontrar en estado puro en la corteza terrestre en una variedad de forma o combinado con otros elementos. Este elemento se puede también encontrar en depósitos de sulfuros como (calcopirita, bornita, caicosina, covelita), en depósitos carbonados como (azurita y malaquita), en depósitos como (chrysocolla y dioptasa)

Es uno de los metales que el hombre conoció y utilizó primero, gracias a que se hallaba en estado nativo o puro en la naturaleza. Se conoce su uso hace por lo menos 7,000 mil años en regiones de Irak y Turquía, usándose para fabricar armas, joyas, y diversos utensilios.

En la actualidad gracias a las distintas cualidades físicas y químicas que posee, es muy utilizado en diversos campos, por ejemplo en electrónica por ser un metal que permite fácilmente la conductividad eléctrica, así como en química, entre otras por sus propiedades catalizadoras.



Aquí mostramos algunas propiedades y características que posee el cobre

Cobre	
Símbolo químico	Cu
Número atómico	29
Grupo	11
Periodo	4
Aspecto	metálico, rojizo
Bloque	d
Densidad	8960 kg/m³
Masa atómica	63.536 u
Radio medio	135 [3]pm pm
Radio atómico	145 [3]pm (Radio de Bohr)
Radio covalente	138 [3]pm pm
Radio de van der Waals	140 [3]pm pm
Configuración electrónica	[Ar]3d¹⁰4s¹
Estados de oxidación	+1, +2
Óxido	levemente básico
Estructura cristalina	cúbica centrada en las caras
Estado	sólido
Punto de fusión	1357.77 K
Punto de ebullición	3200 K
Calor de fusión	13.1 kJ/mol
Electronegatividad	1,9
Calor específico	385 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	58,108 × 10⁶S/m
Conductividad térmica	400 W/(K·m)

Características físicas:

El cobre comparte junto con otros metales varias características físicas, entre las que se cuentan las siguientes:

Conductividad eléctrica. El cobre es uno de los metales que tienen mayor conductividad eléctrica; (la conductibilidad eléctrica es la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica, dejando circular libremente cargas eléctricas gracias a que dentro de su estructura hay muchos electrones con vínculos débiles que permiten el movimiento de las partículas), tiene una conductividad de $59,6 \times 10^6$ S/m, en un hilo de cobre puro de un metro de longitud y un gramo de masa tiene una resistencia eléctrica de $0,15388 \Omega$ a una temperatura de 20 grados centígrados, siendo asignado como medida estándar de conductividad eléctrica. A pesar de que el cobre en sí no es magnético, al pasar electricidad, a través de hilos de cobre en bobinados se produce un campo magnético.

Conductividad Térmica. El cobre, igual que los demás metales es un buen conductor de calor; tiene una conductividad de $372,1-385,2^1$, (La conductividad térmica es la magnitud que posee un material para conducir calor), gracias a esa peculiaridad ha sido usado antiguamente para fabricar utensilios para cocina.

Dureza. Es duro a temperatura ambiente y temperaturas frías; presenta resistencia a distintas alteraciones físicas, tales como a ser cortado, golpeado o al recibir fuerzas de tracción y empuje. Esa dureza es menor a la de otros materiales como algunos minerales metálicos y no metálicos. Igual que otros metales se vuelve frágil al ser sometidos a temperaturas extremadamente bajas.

Ductilidad. Es junto con el oro y el plomo uno de los metales más dúctiles; sus moléculas pueden deslizarse unas sobre de otras logrando estirarse sin romperse, propiedad por la que es usado para la fabricación de cableado y diversos artefactos que pueden ser sometidos a fuerzas como presiones, estiramientos, etc.

Maleabilidad. El cobre es uno de los metales más maleables junto con el Oro y el Plomo; a temperatura ambiente puede deformarse sin romperse o agrietarse; puede ser transformado estando a temperatura ambiente, como al ser martillado o mediante estiramiento, y presiones continuas.

Otras características del Cobre:

Historia. Es posiblemente el primer metal que el hombre aprendió a utilizar, tanto al encontrarlo en estado puro, manipulándolo mediante golpes en un principio para darle la forma deseada y posteriormente calentándolo y fundiéndolo para poder darle mayor variedad de formas, como herramientas menos toscas y diversos utensilios.

Tal vez el descubrimiento de como fundir el cobre fue casual, al haber puesto piedras que lo contenían en las hogueras junto con otras piedras, notando que el metal se derretía, y con el tiempo el ser humano aprendió a hacerlo deliberadamente, manipulándolo para fabricar armas, joyas y utensilios de este metal, y en un tiempo posterior aprendió a fabricar aleaciones como el bronce combinando cobre con estaño y otros metales.

Al transcurrir de los siglos y de los avances científicos y técnicos se han ido descubriendo nuevas propiedades y usos para este metal.

Usos. Además de ser utilizado para la fabricación de materiales y herramientas como cableado, soldaduras, vasijas, adornos, joyerías, etc. es usado gracias a sus propiedades químicas como su propiedad bactericida, en la fabricación de diversas sustancias bactericidas y fungicidas. También se usa como catalizador en varios procesos químicos, como en los convertidores catalíticos de los automóviles.

Características biológicas que posee el cobre:

Biología. Se encuentra presente en varios organismos, formando parte de sus estructuras; se encuentra presente en el organismo humano en donde ayuda junto con el hierro, en la formación de los glóbulos rojos, así como en el mantenimiento de los vasos sanguíneos, el sistema nervioso y el sistema inmunológico. Su carencia contribuye a padecer osteoporosis y anemia.

Se puede consumir en algunos alimentos que lo contienen como mariscos, legumbres, nueces, papas, granos enteros, cacao, verduras de hoja oscura, y en frutas deshidratadas.

Toxicidad. En grandes cantidades es tóxico para el organismo, como en el caso de la enfermedad de Wilson en donde varios órganos son afectados por la acumulación de depósitos de cobre, especialmente el Hígado y Cerebro, aunque también afecta a otros órganos, provocando problemas hepáticos, renales y cerebrales. Algunas de las fuentes que contribuyen a la intoxicación por cobre es el uso de algunos insecticidas y fungicidas que lo contienen, productos para acuarios, y la ingesta desmedida de suplementos alimenticios que lo contienen pudiendo provocar en casos extremos la muerte.

http://www.ejemplode.com/38-quimica/3474-caracteristicas_del_cobre.html

Características Mecánicas del Cobre

Características Mecánicas del Cobre			
Estado	Resistencia a la tracción, kg/mm²	Límite elástico, kg/mm²	Alargamiento en la rotura, %
Fundido	15 – 22	-	25 - 15
Recocido	21 – 24	9	46 - 47
Templado	37 – 41	36	5 - 6

2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE LA PLANTA CONCENTRADORA

El proceso de obtención de un mineral concentrado en una planta concentradora de mineral de cobre por el método de lixiviación consta de los procesos de chancado, molienda y flotación.

El proceso de chancado reduce el tamaño del mineral que proviene de mina hasta un tamaño uniforme de 3/4 de pulgada y se realiza en chancadoras de diversos tipos. El mineral pasa a la sección de molienda con una faja transportadora

El proceso de molienda consiste en reducir el tamaño del mineral que proviene de la sección chancado con un tamaño de 19 050 μm hasta un tamaño de 0,18 mm es decir 180 μm requerido por la sección flotación.

En la sección flotación se separan las partículas de mineral de cobre y se concentran.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN MOLIENDA

Como la reducción de tamaño tiene una relación de reducción muy grande esta se subdivide en dos, una etapa de molienda primaria, una de molienda secundaria con una etapa de clasificación y remolienda.

Molienda primaria

El mineral es recibido por un molino de barras, que reduce su tamaño hasta un tamaño comprendido entre 1 500 y 2 500 μm . En este caso la molienda se realiza en seco y en circuito abierto. El producto que sale del molino de barras cae por gravedad a la etapa de molienda secundaria.

Molienda secundaria

El mineral que sale de la molienda primaria ingresa a un molino de bolas donde reduce su tamaño hasta 180 μm . Esta molienda se realiza en húmedo y en circuito cerrado con una etapa de clasificación

Clasificación

Tiene como propósito garantizar que las partículas que salgan a la sección tengan como tamaño máximo los 180 μm requerido para el proceso de flotación. Para lograrlo se utilizan ciclones o zarandas, aunque la tendencia moderna es el uso de zarandas de alta frecuencia.

Para regular y uniformizar el flujo de pulpa que llega a la zaranda, el flujo del molino de bolas se almacena previamente en un tanque de estabilización.

Transporte de pulpa del molino al tanque de estabilización.

El flujo de pulpa se transporta por un sistema de tuberías, donde la pulpa es impulsada por una bomba de pulpas. Para garantizar la operatividad de la planta se instalan dos bombas en paralelo, de manera que cuando la bomba de pulpa en operación sale de servicio por razones de falla o mantenimiento la otra entra en servicio y se mantiene la continuidad de la producción.

2.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

En la sección molienda los procesos son:

Molienda primaria

Molienda secundaria

Clasificación.

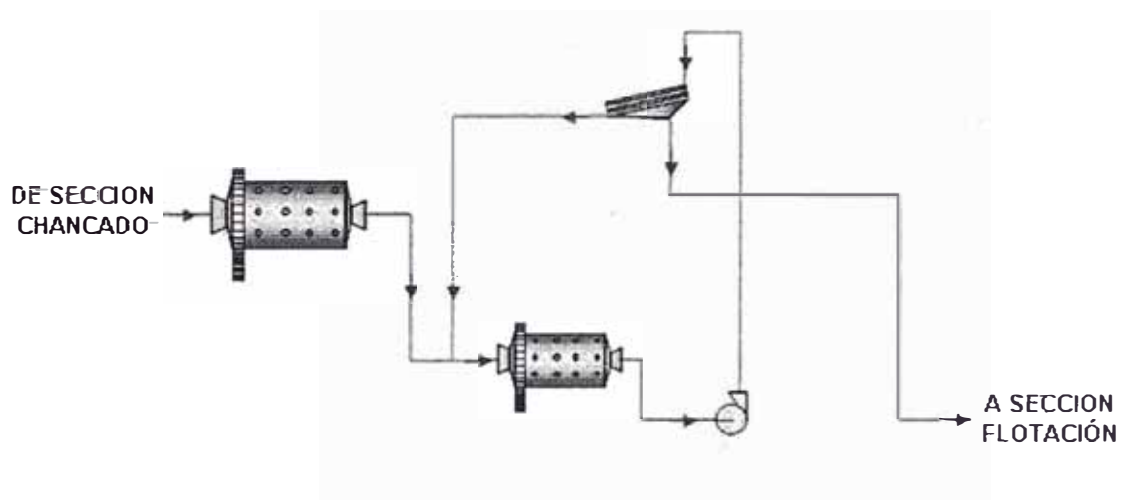


Fig. 2.1 Diagrama de flujo

2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Los principales equipos de la planta son:

- Molino de barras
- Molino de bolas
- Bomba de pulpas
- Tanque estabilizador.
- Zaranda de alta frecuencia

Molinos

Los molinos de barras y de bolas tienen formas constructivas y estructuras similares.

- Los molinos de barras tienen como elementos de molienda barras de acero que se utilizan para la molienda primaria.

Los molinos de bolas cuyos elementos de molienda son bolas de acero que se utilizan para molienda secundaria o remolienda.

Los molinos de barras se caracterizan por tener una forma cilíndrica alargada, debido a que las barras son relativamente largas.

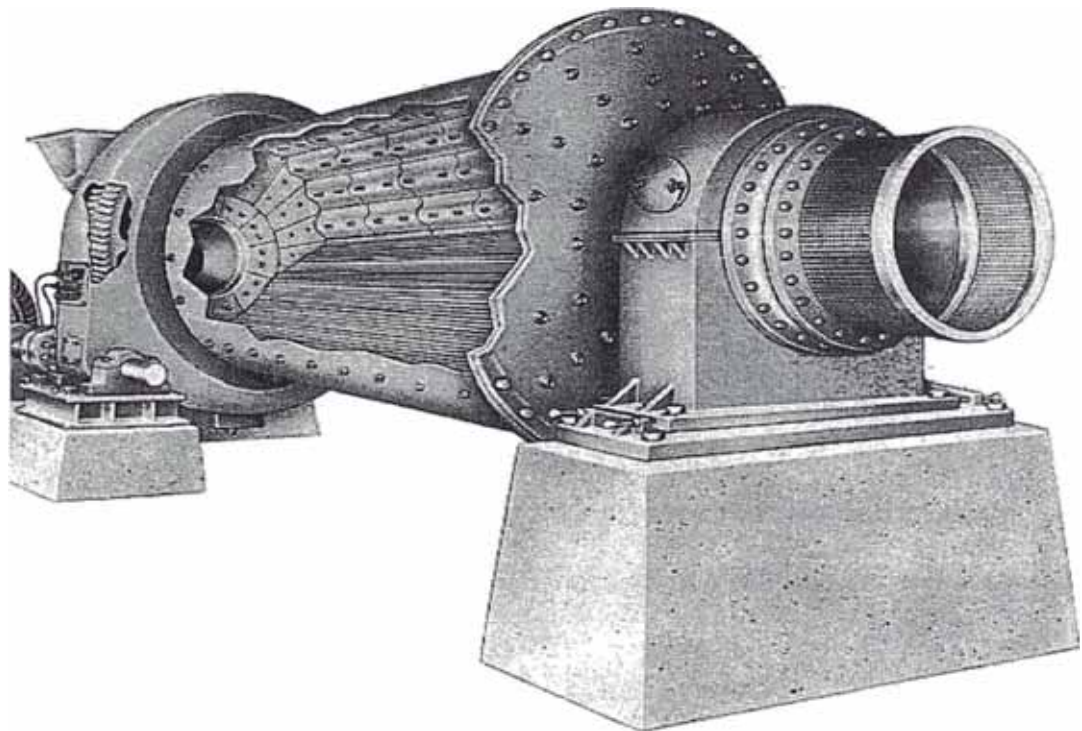


Fig. 2.2 Molino de barras

Los molinos de bolas se caracterizan porque son de menor longitud, muchas veces estas longitudes son iguales al diámetro del molino.

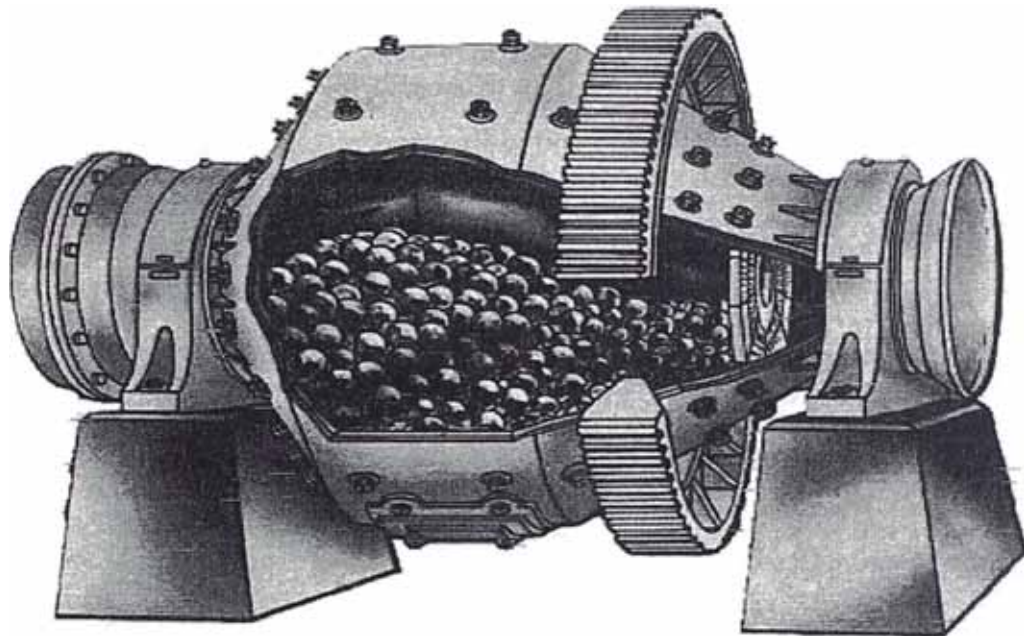


Fig. 2.3 Molino de Bolas

El efecto de molienda se produce porque al girar el cuerpo cilíndrico los elementos de molienda, barras o bolas reciben un movimiento circular que los eleva y luego caen sobre el mineral fracturándolo. El mineral ingresa por un lado y se desplaza por su interior y conforme avanza va reduciendo su tamaño.

Este efecto de caída de los elementos de molienda en el interior del molino está relacionado directamente con la velocidad de giro del molino. Si esta es muy grande los elementos de molienda, por efecto de la fuerza centrífuga se pegarán a las paredes interiores del cuerpo cilíndrico del molino y no se producirá el efecto de molienda.

La mínima velocidad que causa que los elementos de molienda se adhieran a las paredes interiores del cilindro por fuerza centrífuga y no se produzca el efecto de molienda se llama velocidad crítica. Para evitar esta situación los molinos operan a velocidades menores, un porcentaje de esta velocidad puede ser hasta el 80 % de la velocidad crítica. Como resultado se tiene que los molinos operan generalmente con velocidades de 15 a 30 rpm.

Debido a que durante la molienda en el interior del molino se producen grandes impactos y abrasión, para proteger al cilindro este se forra con una gruesa chapa de protección de acero, que se coloca empernada para que cuando se desgaste se pueda reemplazar por otra.

Una característica importante del molino es que está conformado por unos pocos componentes que son:

Cuerpo del molino

- El cuerpo cilíndrico
- Cabezales
- Los muñones de entrada y salida
- El engranaje

Equipo complementario

El piñón

El reductor de velocidad

El motor de accionamiento

Los componentes comunes a los dos tipos de molinos son:

a) Cuerpo cilíndrico

Es un cilindro cerrado formado por un cuerpo cilíndrico y dos tapas o cabezales desmontables.

El cuerpo y los cabezales, que están construidas de chapas con acero soldadas están recubiertas interiormente por una coraza reemplazable de material resistente al impacto y abrasión.

b) Los cabezales

Son las dos tapas laterales que cierran el cuerpo cilíndrico.

Tienen la forma de un anillo de superficie plana o de un tronco de cono cuyo agujero central sirve de ingreso o salida del material.

c) Los muñones

Los cabezales, por su periferia se unen empernados al cuerpo cilíndrico, y por su agujero central con un muñón hueco llamado comúnmente 'trunnion', uno de carga por donde ingresa el mineral al molino y otro de descarga por donde sale el mineral.

Los cabezales de carga y descarga se apoyan en chumaceras de superficie altamente pulida por lo que la fricción es mínima. Las chumaceras tienen un sistema de lubricación adecuado y se apoyan sobre los muros de soporte de concreto de la cimentación.

d) El engranaje

Como el molino gira a bajas velocidades y es accionado por motores eléctricos, requiere de un sistema de reducción de velocidad, de la velocidad del motor a la velocidad del cuerpo cilíndrico.

Este sistema de variación de velocidad de giro tiene dos componentes, uno que forma parte del molino y un piñón acoplado a un reductor de velocidad externo.

La parte que forma parte del cuerpo del molino es un engranaje montado en el cuerpo cilíndrico, que para poder montarlo en el molino es de tipo partido y tiene un diámetro mayor que los cabezales. Por esta misma razón el diámetro de paso del engranaje es mayor el diámetro del cabezal en que va montado, dejando una distancia suficiente para permitir su montaje. Este engranaje va montado en el lado de la descarga.

e) El piñón

Este engranaje va acoplado a un piñón montado sobre un eje con rodamientos apoyados en una sección independiente de la cimentación. Este piñón recibe la potencia del motor de accionamiento a través del sistema de transmisión.

f) Accionamiento eléctrico.

Los molinos son accionados por motores eléctricos, generalmente de jaula de ardilla de 6 polos, de 440 V con velocidad de giro de 1192 rpm de fabricación estándar.

g) Reductor de velocidad

Debido a la diferencia de velocidades entre el giro del piñón del molino y la velocidad del motor de accionamiento se requiere de un reductor de velocidad para accionar el molino. Se utilizan reductores de velocidad comerciales diseñados para uso minero.

El montaje del molino se realiza en obra, ensamblando sus componentes con una grúa móvil especial. Las grúas puente se utilizan para operaciones de mantenimiento que requieran la manipulación de motores eléctricos o de sus componentes.

h) Zarandas vibratorias

El producto que sale de la sección molienda al menos el 80 % tiene un tamaño menor a 180 μm pero para el proceso de flotación se requiere que el 100 % sea igual o menor a 180 μm . Para garantizarlo el circuito de molienda secundario es un circuito cerrado que opera con una etapa de clasificación.

Una zaranda vibratoria separa las partículas de tamaños diferentes en una criba mediante el sistema pasa – no pasa. Las partículas caen sobre cribas con agujeros de determinado tamaño, las más pequeñas caen a través de los agujeros y salen del proceso de molienda y las de mayor tamaño se quedan sobre la criba y son enviadas de retorno al molino.

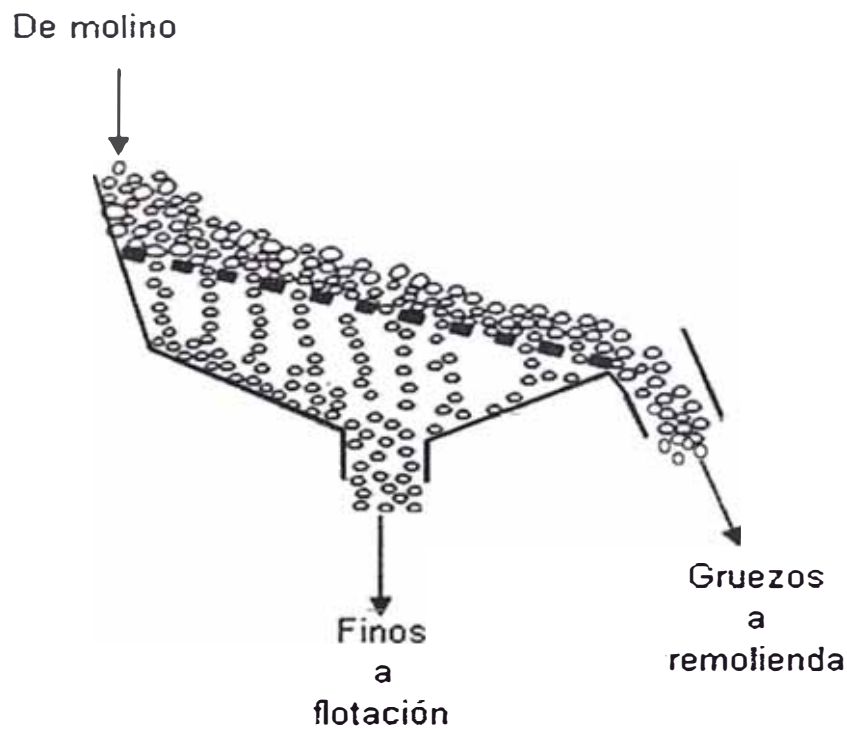


Fig. 2.4 Esquema de los flujos de pulpa en una zaranda vibratoria de una criba.

2.6 DISPOSICIÓN DE LA PLANTA

La sección se ubica en un edificio de estructura metálica, Siguiendo el flujo del proceso primero se encuentra el molino de barras, que recibe el mineral de la sección chancado, a continuación sigue el molino de bolas. Luego se inicia el circuito de bombeo, con una bomba principal que por medio de un sistema de ductos llega hasta el tanque estabilizador y de allí a la zaranda de clasificación, de donde parten dos ductos uno hacia el molino de bolas y otro hacia la sección flotación.

CAPITULO 3

DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

3.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Se inicia el diseño con la disposición de los equipos para la sección de molienda, considerando la tecnología moderna de los diferentes equipos de molienda recomendada.

Diseñaremos el Lay Out teniendo en consideración los siguientes factores:

- Tecnología de molienda
- Tamaño de los equipos
- Áreas libres para operación y mantenimiento
- Ingreso y salida del mineral a moler
- Suministro de agua
- Accesos para descargas de mineral y canaletas de transporte
- Accesibilidad de la grúa puente
- Estructuras metálicas de soporte de equipos, tuberías, tanques, etc.

3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

3.2.1 Cálculo de la potencia de los molinos

La potencia de los molinos se determina con la teoría de F. C. Bond, que se basa en un valor experimental del índice de trabajo, que se obtiene a nivel de laboratorio y que se corrige con factores que dependen de las condiciones de operación del molino para obtener la energía específica. Con ésta y la capacidad de procesamiento del molino se obtiene la potencia neta de molienda.

3.2.1.1 Índice de trabajo

Es un valor experimental que se obtiene a nivel de laboratorio que refleja las condiciones de molienda en condiciones de operación controladas con una determinada malla y recirculación de 250 %

W_i = Índice de trabajo

3.2.1.2 Índice de trabajo corregido

Para obtener las condiciones de funcionamiento de un molino prototipo que opere en otras condiciones, con otra malla, con otro porcentaje de recirculación o sin recirculación, el índice de trabajo se corrige con siete factores que dependen del tipo de molino y las nuevas condiciones de operación.

Se calcula como el producto del índice de trabajo W_i por siete factores de corrección. Ver (3.1)

$$W_i(c) = W_i \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot F_7 \quad (3.1)$$

$W_i(c)$ = Índice de trabajo, potencia consumida con una determinada malla y una recirculación del 250 %.

3.2.1.3 Factores de corrección

Los factores de corrección se definen en función de las características de los molinos y sus condiciones de operación, las que toman valores numéricos según los siguientes criterios:

F_1 Factor de tipo de molienda

Para molinos de barra y de bolas

Factor	F_1
Molienda seca	1,4
Molienda húmeda	1.3

F_2 Factor de tipo de circuito abierto o cerrado

Solo se aplica a molino de bolas que operan en circuito abierto.

Tabla 3.1 Factores de tipo de molienda

%	F_2
50	1.035
60	1,050
70	1,100
80	1,200
90	1,400
92	1,460
95	1,570
98	1.700

F₃ Factor de eficiencia por diámetro de molino

Se aplica a molinos de barras y bolas:

Diámetro del molino (pies)	Factor F ₃
8	1
≠ 8	$\left(\frac{8}{D}\right)^{0,2}$
> 12	0.9146

F₄ Factor de tamaño de alimentación

Se calcula con la expresión

$$F_4 = \frac{1}{Rr} \cdot \left[Rr + (Wi - 7) \cdot \left(\frac{F_{80} - F_0}{F_0} \right) \right]$$

Rr = Relación de reducción

F₀ = Tamaño óptimo de partícula

- Para molinos de barras

$$F_0 = 16\,000 \cdot \sqrt{\frac{13}{Wi}}$$

- Para molinos de bolas

$$F_0 = 4\,000 \cdot \sqrt{\frac{13}{Wi}}$$

F₅ Factor de sobremolienda de finos

Solo se aplica a molinos de bolas, para productos menores a 80 % malla 200 (74 μm)

$$P_{80} < 74\mu\text{m} \quad F_5 = \frac{P_{80} + 10,3}{1,145 \cdot P_{80}}$$

$$P_{80} \geq 74\mu\text{m} \quad F_5 = 1$$

F₆ Factor de razón de reducción de molienda

Se establece un valor de referencia, con el que se calcula F₆

- Para molinos de barras

$$R_{ro} = 8 + 5 L_r / D$$

$$F_6 = 1 + (R_r - R_{ro})/150$$

- Para molinos de bolas

$$R_r < 6$$

$$F_6 = \frac{20 \cdot (R_r 80 - 1,35) + 2,6}{20 \cdot (R_r 80 - 1,35)}$$

$$R_r \geq 6$$

$$F_6 = 1$$

F₇ Corrección por grado de uniformidad de material alimentado

Solo se aplica a molinos de barras, y depende del circuito de chancado.

- Para chancado en circuito abierto $F_7 = 1,4$
- Para chancado en circuito cerrado $F_7 = 1,2$

3.2.1.4 Energía específica

Se expresa como:

$$W = W_i(c) \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right] \quad (3.2)$$

W = Energía consumida por tonelada corta molida, kWh/tc

3.2.1.5 Potencia mecánica del molino

La potencia neta de molienda depende del consumo específico y la capacidad de molienda P_{mz}:

$$P_m = W \cdot P_{mol} \quad (3.3)$$

3.2.2. Diámetro y longitud de molinos

Este depende de:

Potencia

- Forma de la descarga
- Volumen de elementos de molienda
- Fracción de la velocidad crítica y
- Relación entre diámetro y longitud del molino.

3.2.2.1 Molino de barras

El diámetro del molino se determina con la expresión:

$$D_B = \left(\frac{Pe}{K_r \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot V_p^{0,555} \cdot C^{1,505}} \right)^{\frac{1}{3,5}} \quad (3.4)$$

K_r = Constante de proporcionalidad que depende de la descarga.

Descarga molino de barras	K_r
<u>Molienda húmeda</u>	
• Descarga por rebalse	$3,590 \times 10^{-5}$
• Periférica central	$4,037 \times 10^{-5}$
<u>Molienda seca</u>	
• Descarga periférica por extremo final	$4,487 \times 10^{-5}$

$\frac{L}{D}$ = Relación longitud/diámetro

C = Fracción de velocidad crítica 60 a 70 %

V_p = Volumen cargado con barras 30 a 40 %.

3.2.2.2 Molino de bolas

$$Db = \left[\frac{Pe}{Kb \cdot \left(\frac{L}{D}\right) \cdot Vp^{0,461} \cdot C^{1,505}} \right]^{\frac{1}{3,5}} \quad (3.5)$$

Kb = Constante de proporcionalidad que depende de la descarga

Descarga molino de bolas

Kb

Molienda húmeda

- Descarga por rebalse $4,365 \times 10^{-5}$
- Periférica central $4,912 \times 10^{-5}$

Molienda-seca

- Descarga periférica por extremo final $5,426 \times 10^{-5}$

Vp = Volumen de cargado con barras 30 a 40 %.

C = Porcentaje de velocidad crítica 60 a 70 %

3.2.2.3 Selección del diámetro y longitud

Las expresiones para obtener el diámetro de los molinos están en función de la relación (L/D).

Los fabricantes de molinos, tienen molinos de tamaños normalizados pero la relación (L/D) con la que se optimiza el consumo de potencia se obtiene mediante iteraciones.

3.2.3 Velocidad de giro

3.2.3.1 Velocidad crítica

La velocidad de giro del molino es importante para garantizar la acción de molienda causada por la acción llamada cascadeo que es el efecto de la caída de las barras o bolas sobre el mineral bajo molienda.

Al girar el molino, las barras o bolas, por efecto de la fuerza centrífuga tienden a adherirse a la pared cilíndrica del molino. Si la velocidad de giro del molino es muy grande las bolas y barras permanecen adheridas a las paredes del molino durante todo el giro del molino, y no causan el efecto de molienda.

Si la velocidad es muy pequeña la fuerza centrífuga no puede adherirlas a la pared cilíndrica del molino, se quedan en el fondo del cuerpo cilíndrico y tampoco se produce el efecto de molienda.

Para que se produzca el efecto de molienda la velocidad debe producir una fuerza centrífuga tal que las barras o bolas se adhieran a la pared, pero debe esta fuerza ser menor al peso de las barras o bolas, de modo que al llegar a la parte superior del cuerpo cilíndrico caigan por gravedad produciendo el efecto de molienda.

Esta caída es el ya mencionado cascadeo y se produce cuando el molino gira a la velocidad crítica la que se expresa como:

$$N_c = \frac{76,63}{\sqrt{D}} \quad (3.6)$$

N_c = Velocidad de giro del molino, rpm

3.2.3.2 Velocidad de operación

La velocidad de operación del molino es una velocidad siempre menor a la velocidad crítica.

En la práctica la velocidad de operación está comprendida en un rango de velocidades establecido por dos porcentajes máximo y mínimo de esta velocidad crítica.

Estos porcentajes de la velocidad crítica dependen del tipo de molino y son: los siguientes.

Tipo de molino	Velocidad crítica (%)
Molino de barras	60 a 78
Molino de bolas	65 a 75

3.2.4 Engranajes del molino

Por razones constructivas el engranaje del molino tiene la forma de una corona que se ubica sólidamente unido a la periferia del cuerpo cilíndrico y gira con este cuerpo, mientras que el piñón se ubica en un eje auxiliar montado sobre dos rodamientos

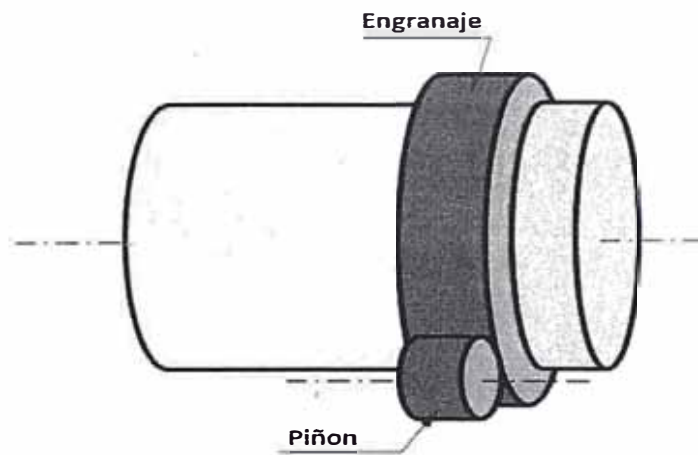


Fig. 3.1 Esquema de tren de transmisión piñón – engranaje

De las condiciones anteriores y con los diámetros usuales en molinos, resultan velocidades de giro de operación del cuerpo cilíndrico del orden de 15 a 30 rpm, que con una relación de transmisión de 5 a 8 se tienen velocidades del piñón del orden de 75 a 240 rpm.

El sistema de accionamiento se completa con un reductor de velocidad y un motor eléctrico de accionamiento ver esquema de instalación en la Fig. 3.2.

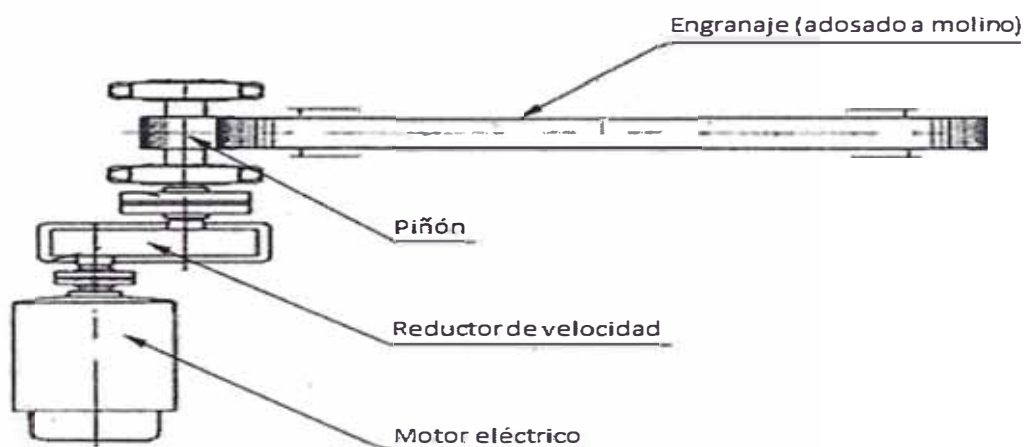


Fig. 3.2 Esquema de sistema de accionamiento.

Se utilizan motores eléctricos usados como accionamientos asíncronos estándar de 4,6 y 8 polos por lo que las reducciones de velocidades requeridas están en el orden de 9 a 15, las que se pueden obtener con una reducción de engranajes de una sola etapa.

Se utilizan engranajes cilíndricos de dientes rectos o de dientes helicoidales. En este caso se utilizan engranajes de dientes helicoidales los que se diseñan con el método de diseño recomendado por la AGMA y las normas técnicas pertinentes.

3.2.5 Cálculo de los engranajes

Las ruedas dentadas, piñón y engranaje y su disposición se muestran en la Fig. 3.3.

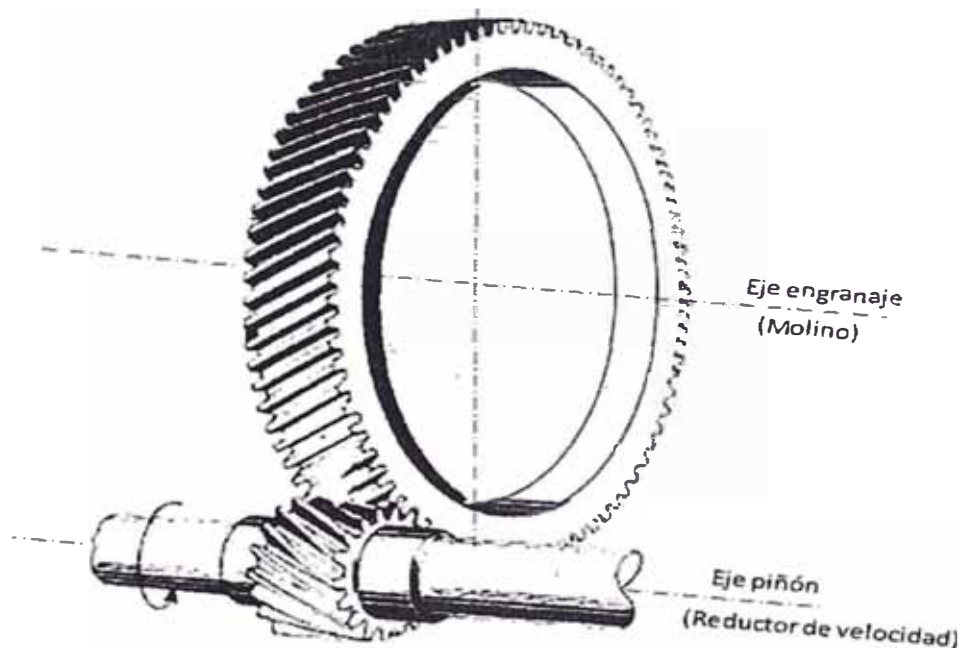


Fig.3.3 Engranaje y piñón helicoidales del molino

Por ser engranajes simple helicoidal

Angulo de presión	θ	20°
Número mínimo de dientes del piñón	Z_p	20
Módulo mínimo	m	16
Angulo de hélice: mínimo	ψ_{min}	15
máximo	ψ_{max}	25

- Relación de velocidad entre el engranaje y el piñón

$$m_G = \frac{n_g}{n_p} \quad (3.7)$$

m_G = Relación de velocidad

n_g = Velocidad del engranaje

n_p = Velocidad del piñón.

Como el engranaje está unido al cilindro, la velocidad del engranaje es igual a la del molino.

- La suma del número de dientes del engranaje y el piñón

$$\Sigma Z = (Z_g + Z_p) = \frac{2 \cdot C \cdot \cos(\psi)}{m} \quad (3.8)$$

- Diámetro de paso del piñón:

$$D_p = \frac{m \cdot Z_p}{\cos(\psi)} \quad (3.9)$$

D_p = Diámetro de paso del piñón

- Diámetro de paso del engranaje

$$D_g = D_p \cdot i \quad (3.10)$$

D_g = Diámetro de paso del engranaje

- Velocidad de giro del piñón

$$N_p = i \cdot N_g \quad (3.11)$$

- Velocidad tangencial del piñón

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n_p}{60 \, 000} \quad (3.12)$$

- Ancho de diente

$$F_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{\text{sen}(\psi)} \quad (3.13)$$

- Torque

$$T_p = \frac{9 \, 540 \cdot P_t}{N} \quad (3.14)$$

- Fuerza tangencial

$$W_{tp} = \frac{2 \cdot T_p}{D_p} \quad (3.15)$$

3.2.5.1 Esfuerzos en los dientes del piñón y engranaje

Se producen esfuerzos por flexión en la raíz de los dientes del piñón y del engranaje así como también esfuerzos por contacto superficial entre las caras del piñón y del engranaje.

Estos esfuerzos sirven para seleccionar adecuadamente las dimensiones y materiales del piñón y del engranaje.

- Selección de materiales

Se seleccionan materiales para el piñón y el engranaje con las características siguientes:

Piñón:

$$\text{Esfuerzo por flexión} \quad ; \quad S_{atp} \quad (3.16)$$

$$\text{Esfuerzo de contacto} \quad ; \quad S_{acp} \quad (3.17)$$

$$\text{Dureza superficial} \quad ; \quad BHN_p \quad (3.18)$$

Engranaje:

$$\text{Esfuerzo por flexión} \quad ; \quad S_{atg} \quad (3.19)$$

$$\text{Esfuerzo de contacto} \quad ; \quad S_{acg} \quad (3.20)$$

$$\text{Dureza superficial} \quad ; \quad BHN_g \quad (3.21)$$

3.2.5.2 Esfuerzos por flexión

Se determinan los factores

K_o = Factor de sobrecarga

K_s = Factor de tamaño

K_B = Factor de espesor de aro

K_m = Factor de distribución de carga

K_v = Factor dinámico

J_p = Factor geométrico del piñón

J_g = Factor geométrico del engranaje

K_L = Factor de vida

K_T = Factor de temperatura

K_R = Factor de seguridad

- **Esfuerzos por resistencia a la flexión en el piñón**

Módulo en el plano transversal:

$$m_t = \frac{2 \cdot m}{\cos(\psi)} \quad (3.22)$$

Esfuerzos S_{tp} calculados en la raíz del piñón

$$S_{tp} = \frac{Wt \cdot K_o \cdot K_s \cdot K_B \cdot K_m}{F \cdot m_t \cdot K_v \cdot J_p} \quad (3.23)$$

S_{tp} = Esfuerzo por flexión en la raíz del diente del piñón.

Esfuerzos admisibles ajustados en la raíz del piñón

$$S'_{atp} \geq S_{atp} \cdot \left(\frac{K_L}{K_T \cdot K_R} \right) \quad (3.24)$$

Se debe cumplir que:

$$S'_{atp} \geq S_{tp} \quad (3.25)$$

- **Esfuerzos por resistencia a la flexión en el engranaje**

Esfuerzos calculados en el engranaje

$$S_{tg} = S_{tp} \cdot \left(\frac{J_p}{J_g} \right) \quad (3.26)$$

Se debe cumplir que:

$$S_{atg} \geq S_{tg} \quad (3.27)$$

3.2.5.3 Esfuerzos por desgaste superficial

Se determinan los factores:

C_p = Coeficiente de propiedades elásticas del material

C_o = Factor de sobrecarga

C_s = Factor de tamaño

C_m = Factor de distribución de carga

C_f = Factor de condición superficial

J = Factor geométrico

C_v = Factor dinámico

- **Esfuerzos por desgaste en el piñón**

Esfuerzos de contacto en el piñón, con la expresión

$$S_C = C_P \cdot \sqrt{\frac{Wt \cdot C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f}{D_p \cdot F \cdot J \cdot C_v}} \quad (3.28)$$

El esfuerzo por contacto del piñón debe cumplir que:

$$S_{acp} > S_C$$

- **Esfuerzos por desgaste en el engranaje**

$$S'_{cg} = S_C \left(\frac{CL \cdot CH}{CT \cdot CR} \right) \quad (3.29)$$

Se debe cumplir que:

$$S_{acg} \geq S_{cg}$$

3.2.6 Potencia que pueden transmitir el piñón y el engranaje

- **Cálculo por fatiga superficial (desgaste)**

Potencia que pueden transmitir

$$P = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{np \cdot F \cdot C_v \cdot J}{C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f} \right) \cdot \left(\frac{Sag \cdot D_p \cdot CL \cdot CH}{C_P \cdot C_R \cdot C_T} \right)^2 \quad (3.30)$$

- **Cálculo por resistencia a la fatiga.**

Potencia que puede transmitir el piñón se determina con:

$$P_p = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{D_p \cdot np \cdot mt \cdot F \cdot J_p \cdot K_f \cdot K_v \cdot S_{atp}}{K_T \cdot K_R \cdot K_m \cdot K_o} \right) \quad (3.31)$$

$$P_p > P \quad (3.32)$$

Potencia que puede transmitir el engranaje

Se determina con:

$$P_g = P_p \cdot \left(\frac{J_g}{J_p} \right) \quad (3.33)$$

$$P_g > P \quad (3.34)$$

3.2.7 Potencia en el eje del piñón

El detalle de la instalación del piñón se muestra en la figura 3.4

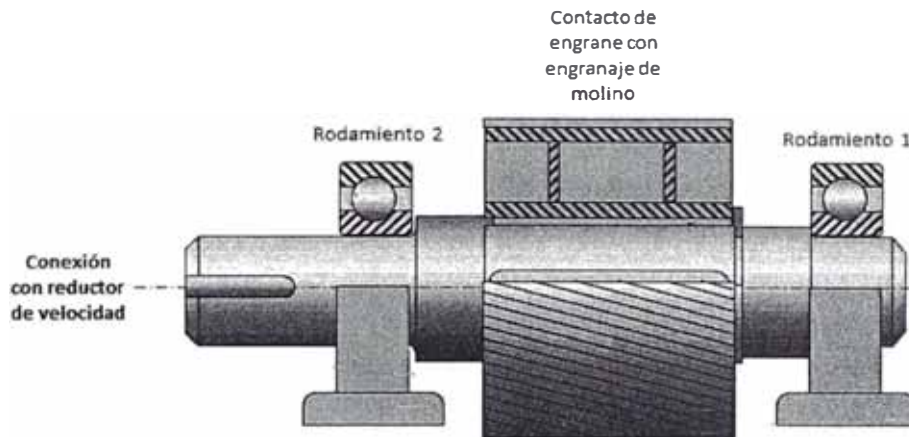


Fig. 3.4 Instalación del piñón. Dos rodamientos de apoyo, un contacto de engrane con engranaje de molino

La eficiencia mecánica de la transmisión está determinada por la eficiencia del engrane entre el engranaje y el piñón y los dos rodamientos de soporte del piñón.

La eficiencia mecánica total de la transmisión del molino es:

$$\eta_{tm} = \eta_e \cdot \eta_r^2 \quad (3.35)$$

η_{tm} = Eficiencia total de la transmisión

η_e = Eficiencia de engrane

η_r = Eficiencia de los rodamientos del piñón

La potencia requerida en el eje del piñón resulta:

$$Pmp = \frac{Pm}{\eta_{tm}} \quad (3.36)$$

3.2.8 Reductor de velocidad motor eléctrico – piñón de molino

El reductor de velocidad debe cumplir:

- a) Reducir la velocidad del motor eléctrico al valor de la velocidad de giro del piñón.
- b) Suministrar la potencia de entrada en el piñón a la velocidad de giro del piñón.

3.2.9 Motor eléctrico

La potencia del motor se obtiene considerando la eficiencia del reductor de velocidad instalado entre el piñón del molino y el motor eléctrico.

$$P_{me} = \frac{P_{mp}}{\eta_R} \quad (3.37)$$

P_{me} = Potencia del motor eléctrico

η_R = Eficiencia del reductor de velocidad

3.2.10 Sistema de bombeo de pulpa

El sistema de bombeo de pulpa se muestra en la figura. 3.5. Este sistema está conformado por un tanque que recibe la pulpa del tromel del molino, una bomba de pulpa que succiona la pulpa de este tanque y la bombea al tanque que alimenta la zaranda vibratoria a través de una tubería que tiene dos tramos, uno de impulsión y otro de descarga.

El tanque se ubica de modo que la base del tanque se quede sobre la cota ingreso de la zaranda.

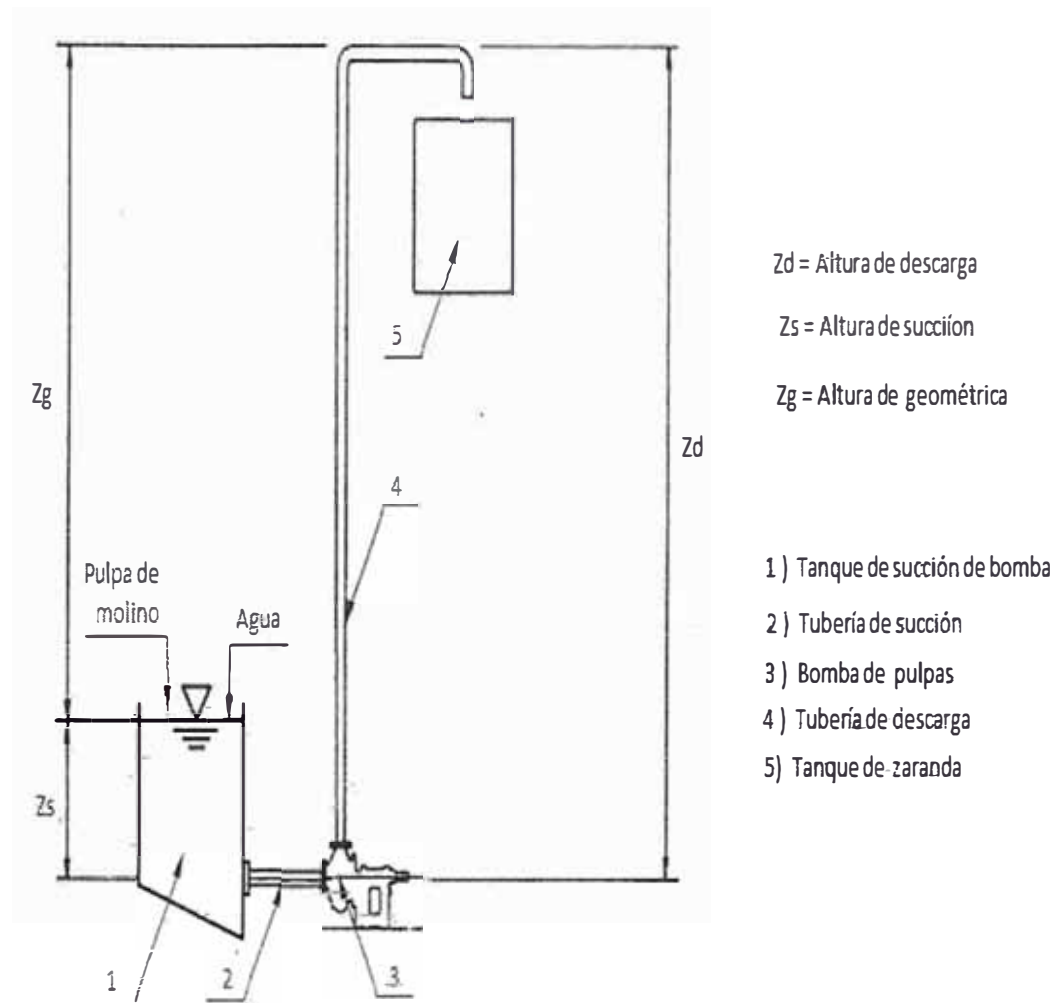


Fig. 3.5 Sistema de bombeo de pulpa

3.2.11 Tanque de succión de la bomba

El tanque de succión de la bomba se ubica en el lado de descarga del molino, bajo el tromel. Fig. 3.6. El flujo de pulpa que sale es recibido por este tanque que tiene una doble función, una es estabilizar el flujo que viene del molino y otra es recibir un flujo de agua para que la pulpa tenga una densidad adecuada para que la bomba la pueda bombear.

El flujo de pulpa y de agua ingresan por la parte superior y la alimentación de la bomba se realiza por la parte inferior, a no menos de 10 cm del fondo del tanque para evitar el ingreso de partículas sólidas que puedan dañar la bomba.

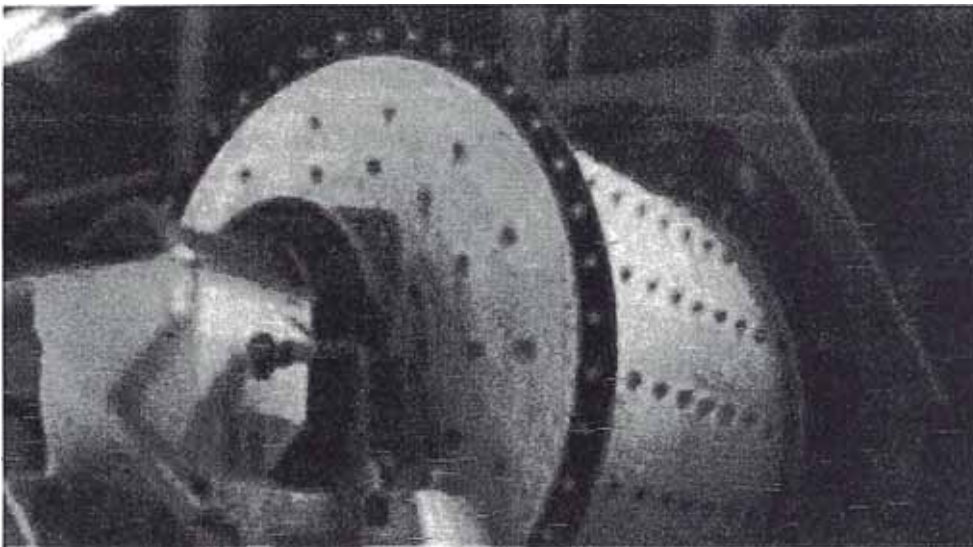


Fig. 3.6 Tanque de succión de la bomba de pulpas

3.2.12 Tanque de estabilización de zaranda

El tanque de estabilización, se ubica sobre el ingreso de la zaranda, la alimentación proviene de la tubería de descarga e ingresa por la parte superior del tanque.

La salida de la pulpa se realiza por la parte inferior del tanque, también a 10 cm sobre el fondo del tanque.

Este tanque generalmente es de acero, tiene una forma cilíndrica y tiene un volumen igual a la del tanque de succión.

3.2.13 Tubería

La tubería puede ser de acero o de polietileno de alta resistencia, generalmente se utiliza el polietileno debido a que por su flexibilidad se adaptan a diversos recorridos con curvas de amplio radio que reducen las pérdidas por curvas y además no requiere de curvas y acoples intermedios.

a) Velocidad mínima

El diámetro de la tubería se deberá seleccionar de manera que la velocidad del flujo sea mayor a la mínima requerida para evitar la sedimentación de sólidos y que se evite el excesivo desgaste de la tubería.

Se determina con la expresión:

$$VL = F_L \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot di \cdot (S - Sw)}{St}} \quad (3.38)$$

VL = Velocidad mínima de la pulpa en la tubería

F_L = Factor corrección

di = Diámetro interior de la tubería

S = Gravedad específica de sólidos

Sw = Concentración de sólidos, %

St = Factor de ajuste

b) Velocidad real de la pulpa en la tubería

$$v = 1273 \cdot \left(\frac{Q}{di^2} \right) \quad (3.39)$$

v = velocidad del flujo de pulpa

Q = Caudal de pulpa

Para evitar que se produzca sedimentación en la tubería se debe cumplir que:

$$V > VL \quad (3.40)$$

c) Pérdidas por fricción en la tubería

Utilizando el diagrama de Moody se tiene:

$$Hf = f \cdot \frac{Le}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.41)$$

d) Pérdidas en transición de ingreso a la tubería en el tanque de succión.

$$Htr = \frac{0,55}{2 \cdot 9.81} \cdot (Vs^2 - Vi^2) \quad (3.42)$$

V_i = Velocidad antes de la transición

V_s = Velocidad después de la transición

e) Pérdidas en la succión

$$Hs = 0,5 \cdot \frac{vi^2}{2 \cdot g} \quad (3.43)$$

H_s = Perdidas en la succión, mcp

f) Pérdidas en la descarga

H_d = Perdidas en la descarga, en mcp

$$Hd = 0,5 \cdot \frac{Vs^2}{2 \cdot g} \quad (3.44)$$

g) Altura de pérdidas

H_{ft} = Altura de pérdidas en la tubería

$$H_{ft} = Hf + Hs + Hd + Htr \quad (3.45)$$

h) Altura dinámica total

$$Hm = (Zd - Zs) + Hft \quad (3.46)$$

Hm = Altura dinámica total

Zd = Altura estática de descarga, mcp

Zs = Altura estática de aspiración, mcp

i) Corrección para obtener la altura dinámica en metros de agua

Los cálculos anteriores se realizaron considerando las alturas medidas en metros de pulpa. Los fabricantes de bombas presentan los datos de las bombas en metros de agua, por lo que para seleccionar la bomba se requiere obtener la altura dinámica total equivalente en metros de agua.

$$Hda = \frac{Hm}{HR} \quad (3.47)$$

Hda = Altura dinámica total, en metros de agua

HR = Factor de corrección

j) Corrección para obtener la altura dinámica en metros de agua

Los cálculos anteriores se realizaron considerando las alturas medidas en metros de pulpa. Los fabricantes de bombas presentan los datos de las bombas en metros de agua, por lo que para seleccionar la bomba se requiere obtener la altura dinámica total equivalente en metros de agua.

$$Hda = \frac{Hm}{HR} \quad (3.48)$$

Hda = Altura dinámica total, en metros de agua

HR = Factor de corrección

k) **Potencia de la bomba**

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{da}}{3\,960 \cdot \eta_b} \quad (3.49)$$

P_b = Potencia mecánica de la bomba

γ = Gravedad específica de la pulpa

Q = Caudal de pulpa

H_{da} = Altura dinámica, mca

η_b = Eficiencia de la bomba

l) **NSPH**

El NSPHa de la instalación se determina con:

$$NSPH_a = \frac{H_a - H_v}{S_m} + Z_s - H_f \quad (3.50)$$

$NSPH_a$ = NSPH de la instalación

H_a = Presión atmosférica, Pa

H_v = Presión de vapor del líquido, Pa

S_m = Peso específico de la pulpa, mcp

Z_s = Altura estática de carga, mcp

H_f = Perdidas por fricción en la tubería de aspiración, mcp

Se debe cumplir que:

$$HNSPH_a > NSPH_b \quad (3.51)$$

3.3 PARÁMETROS PARA DISEÑO

La sección molienda tiene los siguientes parámetros de diseño

Producción anual	TM/año	403200
Meses de operación	Mes/ año	12
Producción mensual	TM/mes	33 600
Días de operación mensual	días	28
Producción diaria	1200	TMD
Horas de operación diaria	h	24
Capacidad de producción horaria	t	50
Capacidad de diseño	tc	58.8
Factor de seguridad	%	7.5
Tamaño de partículas de entrada a molienda	μm	19 050
Tamaño de partículas de salida, a flotación	μm	180

3.4 DISTRIBUCIÓN DE LA MOLIENDA

La molienda se hace en dos etapas, una de molienda gruesa con un molino de barras y una de molienda fina con un molino de bolas con las siguientes características:

Molienda primaria

Molino de barras

Alimentación, de la sección chancado	19 050 μm
Descarga, a molienda secundaria	2 000 μm

Molienda secundaria

Molino de bolas

Alimentación, de la sección chancado	2 000 μm
Descarga, a molienda secundaria	180 μm

3.5 MOLINO DE BARRAS

3.5.1 Cálculo de la potencia

Se calcula con el método de F.C. Bond. Los datos para el cálculo son los siguientes:

Índice de trabajo (Wi)	12,73 kWh/tc
Molienda	Seca
Circuito	Abierto
Tipo de descarga	Rebalse

Dimensiones del material.

Alimentación, de la sección chancado	19 050 μm
Descarga, a molienda secundaria	2 000 μm
Relación de reducción	9,525
Relación (L/D)	1,7
Reducción de longitud de la barra	0.5 pies

El cálculo de los factores de corrección se realiza con los resultados que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3.2 Factores de corrección

Factores de corrección			
F1	Molienda seca		1.3
F2	80 % producto pasante		1.20
F3	Diámetro		1.0
F4	Por granulometría		1.20
F5	Por sobreremolienda de finos	P80 > 75µm	1
F6	Por ratio de reducción	Rr > 6	1.00
F7	Por grado de uniformidad.		1

El índice de trabajo corregido, con 3.1 resulta:

$$W_i(c) = 12,73 \cdot (1,3) \cdot (1,20) \cdot (1) \cdot (1,2) \cdot (1)$$

$$W_i(c) = 23,83 \text{ kWh/tc}$$

Con los valores de los tamaños de las partículas a la entrada y salida establecidos que son:

$$F80 = 19.050 \mu\text{m}$$

$$P80 = 2.000 \mu\text{m}$$

El consumo específico de energía se obtiene con 3.2:

$$W = 23,83 \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{2000}} - \frac{10}{\sqrt{19050}} \right]$$

$$W = 3,6 \text{ kWh/tc}$$

La potencia mecánica necesaria para operar el molino con 3.3 es:

$$P_m = 3,6 \cdot (55)$$

$$P_m = 198 \text{ kW}$$

3.5.2 Dimensiones del molino

Se determinan el diámetro y la longitud con dimensiones estándar

3.5.2.1 Diámetro

El cálculo del diámetro se realiza con la expresión 3.4 y los siguientes datos:

Factor Kr	:	5,4260 x10 ⁻⁵	
Porcentaje de barras en el molino	:	30	%
Porcentaje de la velocidad crítica	:	74	%
Relación (L/D)	:	1,7	
Porcentaje de llenado con barras	:	30	

Remplazando en 3.4 resulta:

$$D_B = \left(\frac{211}{4,067 \times 10^{-5} \cdot (1,7) \cdot 30^{0,555} \cdot 70^{1,505}} \right)^{\frac{1}{3,5}}$$

$$D_B = 6,58 \text{ pies}$$

Se selecciona un diámetro estándar de:

$$D_B = 7 \text{ pies}$$

3.5.2.2 Longitud

La longitud del molino se obtiene considerando:

$$\frac{L}{D} = 1,7$$

$$L = 11,9 \text{ pies}$$

Se selecciona

$$L = 12 \text{ pies}$$

Por lo tanto para la molienda primaria se seleccionará un molino de barras cuyas dimensiones debe ser de 7'x12'

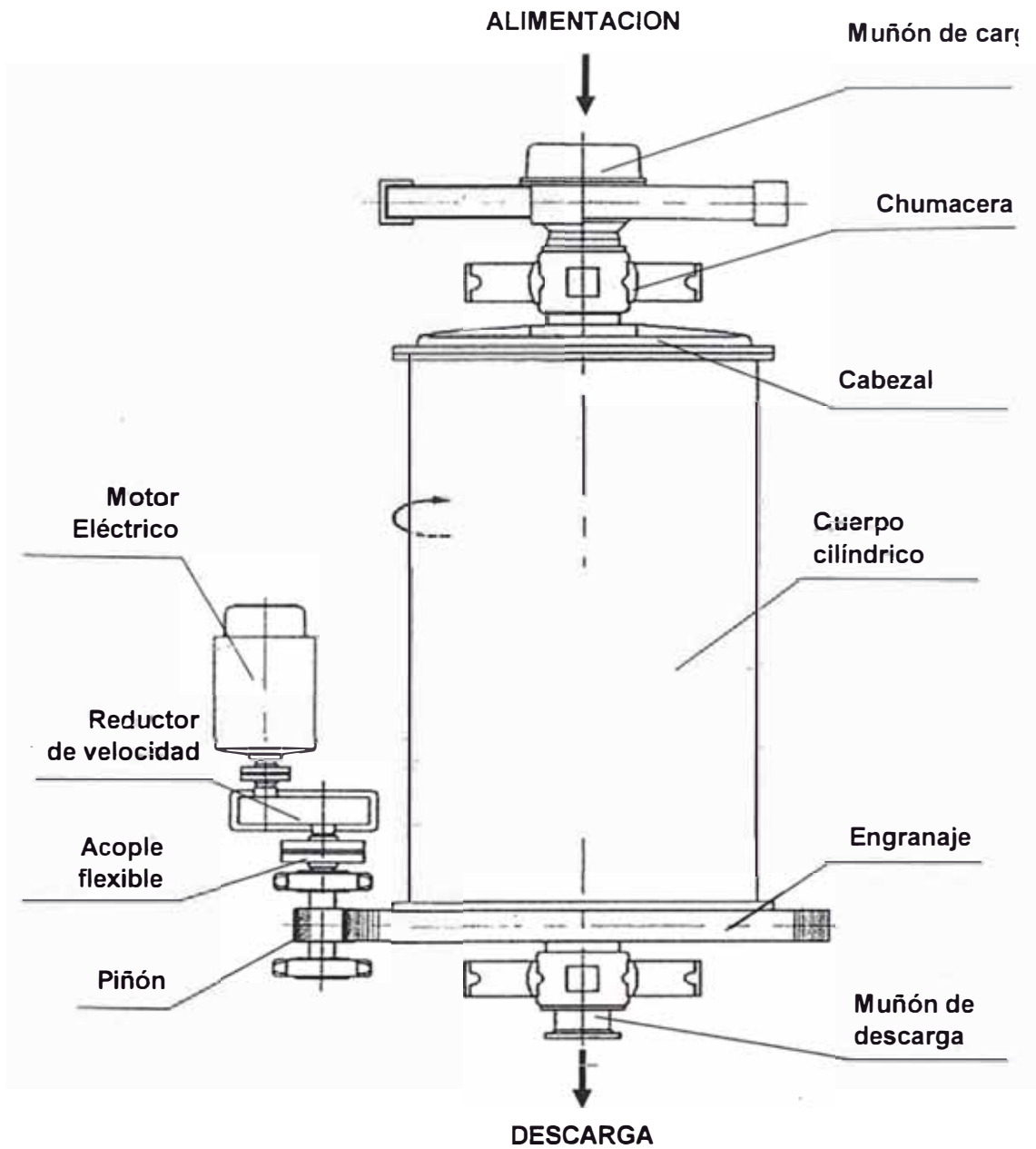


Fig. 3.7 Molino de barras de 7'x12', montaje izquierdo.

3.5.2.3 Velocidad de giro del molino

La velocidad crítica se obtiene con la expresión 3.6

$$N_c = \frac{76,63}{\sqrt{7}}$$

$$N_c = 29 \text{ rpm}$$

Considerando un factor de velocidad crítica de 0,74 resulta:

$$n_c = 0,74 \times 29$$

$$n_c = 21,3 \text{ rpm}$$

En la Fig. 3.7 se muestra la ubicación del engranaje y el piñón. Como el engranaje está unido al cuerpo cilíndrico cuya velocidad del molino es igual a la velocidad del engranaje:

$$n_g = 21,3 \text{ rpm}$$

3.5.2.4 Características de la transmisión

El piñón va montado en un eje que se apoya en dos rodamientos y se acopla con el reductor de velocidad que finalmente se conecta con el motor.

Las características de la transmisión son:

Potencia requerida por el molino: 198kW

Eficiencia de la transmisión

$$\eta_e = 0,98$$

$$\eta_r = 0,99$$

Aplicando la expresión 3.35

$$\eta_{tm} = \eta_e \cdot \eta_r^2 \quad \eta_{tm} = 0,98 \cdot 0,99^2$$

$$\eta_{tm} = 0,96$$

La potencia requerida en el eje del piñón de ingreso, ecuación 3.32

resulta:

$$P_{mp} = \frac{198}{0,96}$$

$$P_{mp} = 206 \text{ kW}$$

Tipo: Engranaje simple helicoidal

Angulo de presión θ 20°

Número mínimo de dientes del piñón Z_p 17

Módulo mínimo m 16

Angulo de hélice: ψ mínimo 15°

ψ máximo 25°

Distancia entre centros 1542 mm

Con las expresiones 3.7, 3.8 y los valores anteriores se calculan los valores de la tabla 3.3

Tabla 3.3 Determinación de los parámetros de la transmisión del molino de barras

Alternativa	$Z_p + Z_g$	m	Z_p	Z_g	i	ψ (Grados)
1	180	16	17	163	9.59	20.94
2	181	16	17	164	9.65	20.09
3	182	16	17	165	9.71	19.20
4	183	16	17	166	9.76	18.28
5	184	16	17	167	9.82	17.31

De la tabla 3.3 se selecciona la alternativa 5 con los resultados siguientes:

Módulo	m	:	16
Número de dientes del piñón	Z_p	:	17 dientes
Número de dientes del engranaje	Z_g	:	167 dientes
Relación de transmisión	i	:	9,82
Angulo de la hélice	ψ	:	17,31 grados

Diámetro del piñón, expresión 3.9

$$D_p = \frac{m \cdot Z_p}{\cos(\psi)} \qquad D_p = \frac{16 \cdot (17)}{\cos(17,31)}$$

$$D_p = 285 \text{ mm}$$

Diámetro del engranaje, expresión 3.10

$$D_g = D_p \cdot i \qquad D_g = 285 \cdot 9,82$$

$$D_g = 2799 \text{ mm}$$

Velocidad del piñón expresión 3.11

$$N_p = i \cdot N_g \qquad N_p = 9,82 \cdot 21,3$$

$$N_p = 209 \text{ rpm}$$

Velocidad tangencial del piñón, expresión 3.12

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n_p}{60 \ 000} \qquad V_p = \frac{\pi \cdot 285 \cdot 209}{60 \ 000}$$

$$V_p = 3,12 \text{ m/s}$$

Ancho de diente, Expresión 3.13

$$F_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{\text{sen}(\psi)} \qquad F_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot 16}{\text{sen}(17,31)}$$

$$F_c = 338 \text{ mm}$$

$$F_c = 350 \text{ mm}$$

Torque, expresión 3.14

$$Tp = \frac{9\,540 \cdot Pt}{N}$$

$$Tp = \frac{9540 \cdot 206}{209}$$

$$Tp = 9\,406\,024 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Fuerza tangencial, expresión 3.15

$$Wtp = \frac{2 \cdot Tp}{Dp}$$

$$Wtp = \frac{2 \cdot 9\,406\,024}{285}$$

$$Wtp = 66\,031 \text{ N}$$

3.5.2.5 Cálculo de los esfuerzos por flexión

Se consideran los siguientes factores:

Factor de vida, para 10^7 ciclos	KL	0,94
Factor de temperatura	KT	1,00
Factor de seguridad	KR	1,00
Factor geométrico	Jp	0,45
Factor dinámico	Kv	0,87
Factor de tamaño	KS	1,00
Factor de distribución de carga	Km	2,00
Factor de sobrecarga	Ko	1,25
Factor geométrico de engranaje	Jg	0,58
Factor de espesor de aro	KB	1,00

Módulo en el plano transversal, expresión 3.22:

$$mt = \frac{2 \cdot m}{\cos(\psi)}$$

$$mt = \frac{2 \cdot (16)}{\cos(17.31)}$$

$$mt = 16,76 \text{ mm}$$

Esfuerzo por resistencia a la flexión del piñón, expresión 3.23

$$S_{tp} = \frac{Wt \cdot K_o \cdot K_s \cdot K_B \cdot K_m}{F \cdot m_t \cdot K_v \cdot J_p} \quad S_{tp} = \frac{63\,031 \cdot (1) \cdot (1) \cdot (1) \cdot (2)}{(350) \cdot (17,31) \cdot (0,87) \cdot (0,45)}$$

$$S_{tp} = 72 \text{ MPa}$$

- **Selección del material para el piñón**

Acero bonificado AISI 4340 – 240 HBN

Esfuerzo por flexión $S_{atp} = 210 \text{ MPa}$

Esfuerzo de contacto $S_{acp} = 720 \text{ MPa}$

Dureza mínima superficial 240 BHN

- Esfuerzos admisibles ajustados en la raíz del piñón, expresión 3.24:

$$S'_{atp} \geq S_{atp} \cdot \left(\frac{K_L}{K_T \cdot K_R} \right)$$

$$S'_{atp} = 210 \cdot \left(\frac{0,93}{1 \cdot 1} \right)$$

$$S'_{atp} = 197 \text{ MPa}$$

Cumple con la condición de la expresión 3.25:

$$197 > 72$$

Esfuerzos por resistencia a la flexión en el engranaje

- Esfuerzos calculados en el engranaje, expresión 3.26:

$$S'_{atg} = S_{tp} \cdot \left(\frac{J_p}{J_g} \right)$$

$$S'_{atg} = 72 \cdot \left(\frac{0,46}{0,54} \right)$$

$$S'_{atg} = 56 \text{ MPa}$$

Selección del material

Acero fundido ASTM 148 GRADO 80 – 50 200 HBN

Esfuerzo por flexión $S_{atg} = 200 \text{ MPa}$

Esfuerzo de contacto $S_{acg} = 700 \text{ MPa}$

Dureza mínima superficial 200 *BHN*

Cumple con la condición de la expresión 3.27

$$S_{atg} \geq S'_{atg}$$

$$200 \geq 56$$

3.5.2.6 Cálculo de los esfuerzos por contacto superficial

Factor por propiedades elásticas	C_p	58
Factor de sobrecarga	C_o	1,25
Factor de distribución de carga	C_m	2,00
Factor de tamaño	C_s	1,00
Factor de condición superficial	C_f	1,10
Factor geométrico	I	0,241
Factor dinámico	C_v	0,66
Factor de vida	C_L	0,90
Factor de relación de dureza	C_H	1,02
Factor de temperatura	C_T	1,00
Factor de seguridad	C_R	1,00

Esfuerzo por contacto esperado en el piñón, expresión 3.28

$$S_C = C_P \cdot \sqrt{\frac{Wt \cdot C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f}{D_p \cdot F \cdot J \cdot C_v}}$$

$$S_C = 58 \cdot \sqrt{\frac{66\,031 \cdot 1,25 \cdot 1,0 \cdot 2,0 \cdot 1,1}{0,286 \cdot 0,35 \cdot 0,241 \cdot 0,66}}$$

$$S_C = 0,197 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo del material seleccionado S_{cg} con el esfuerzo esperado S_C se tiene:

$$720 \geq 0,197$$

Esfuerzos de contacto en el engranaje, expresión 3.29

$$S'_{cg} = S_C \left(\frac{CL \cdot CH}{CT \cdot CR} \right)$$

$$S'_{cg} = 0,197 \cdot \left(\frac{1,0 \cdot 1,02}{1,0 \cdot 1,0} \right)$$

$$S'_{cg} = 0,18 \text{ MPa}$$

$$700 \geq 0,18 \quad \text{Aceptable}$$

3.5.2.7 Potencia que pueden transmitir

a) Cálculo por fatiga superficial (desgaste)

S_{ag} = Esfuerzo permisible de contacto

Potencia que pueden transmitir, expresión 3.30

$$P = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{np \cdot F \cdot C_v \cdot J}{C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f} \right) \cdot \left(\frac{S_{ag} \cdot D_p \cdot CL \cdot CH}{C_P \cdot C_R \cdot C_T} \right)^2$$

$$P = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{209 \cdot 350 \cdot 0,66 \cdot 0,241}{1,25 \cdot 1,0 \cdot 1,6 \cdot 1,1} \right) \cdot \left(\frac{71 \cdot 286 \cdot 0,90 \cdot 1,02}{58 \cdot 1,0 \cdot 1,0} \right)^2$$

$$P = 292 \text{ kW}$$

$$307 > 292 \text{ Aceptable}$$

b) Cálculo por resistencia a la fatiga.

b1) Potencia transmitida por el piñón

Se determina con la expresión 3.31:

$$P_p = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{D_p \cdot S_a t p \cdot n_p \cdot m_t \cdot F \cdot J_p \cdot K_L \cdot K_V}{K_T \cdot K_R \cdot K_m \cdot K_o \cdot K_B} \right)$$

$$P_p = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{285 \cdot (21,4) \cdot 209 \cdot (16,76) \cdot 350 \cdot (0,45) \cdot 0,94 \cdot (0,87)}{(1,0) \cdot 1,0 \cdot (1,0) \cdot 2 \cdot (1)} \right)$$

$$P_p = 594 \text{ kW}$$

Con la expresión 3.32 se tiene:

$$594 > 206 \text{ Aceptable}$$

b2) Potencia que puede transmitir el engranaje

Se determina con la expresión 3.33

$$P_{fg} = P_p \cdot \left(\frac{J_g}{J_p} \right) \qquad P_{fg} = 206 \cdot \left(\frac{0,58}{0,46} \right)$$

$$P_{fg} = 206 \text{ kW}$$

Con la expresión 3.34 se verifica que los esfuerzos son aceptables:

$$265 > 206$$

3.5.3 Selección del reductor de velocidad motor eléctrico-molino 7x12

Relación de velocidad

El reductor de velocidad debe transmitir 206 kW con una velocidad de salida de 218rpm con un torque máximo de 9030 N-m.

Si se considera un motor eléctrico de 1800 rpm se requiere una relación de transmisión de 8,26.

En la tabla 3.34 se muestran las características técnicas de los reductores de velocidad EURODRIVE. En esta tabla se selecciona el modelo R147-169 con una relación de transmisión de 8,26 que puede transmitir 13 000 N-m.

3.5.4 Potencia del motor eléctrico

El tipo de reductor de velocidad seleccionado tiene dos etapas de reducción con una eficiencia de transmisión de 92 %. Por lo que la potencia del motor eléctrico, con la expresión 3.37 resulta:

$$P_{me} = \frac{P_p}{\eta_{tr}} \qquad P_{me} = \frac{206}{0.92}$$

$$P_{me} = 223,6 \text{ kW}$$

Selección del motor

Tipo de motor W22 Fundición de hierro IE-2

Número de polos	4
Carcasa	315 L
Potencia	260 kW
Tensión	400 V
Frecuencia	60 Hz
Fases	3

3.6 MOLINO DE BOLAS

3.6.1 Cálculo de la potencia

Potencia base(Wi)	12,73 kWh/t
Molienda	Húmeda
Circuito	Cerrado
Tipo de descarga	Rebalse
Dimensiones del material	
Alimentación de la sección chancado	2 000 μm
Descarga a molienda secundaria	180 μm
Relación de reducción	9.525
Dimensiones del molino	
Diámetro del molino	8 pies
Relación (L/D)	1

Los factores de corrección se dan en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Factores de corrección del molino de bolas

Factores de corrección			
F1	Molienda humeda		1
F2	% producto pasante malla 200		1.2
F3	Diámetro		1
F4	Por granulometría		0.67
F5	Corrección por sobreremolienda	No se aplica	1
F6	Por ratio de reducción		1
F7	Por grado de uniformidad.		1

Con los factores de corrección determinada, el índice de trabajo corregido con 3.1 resulta:

$$W_i(c) = 12,73 \cdot (1) \cdot (1,20) \cdot (1) \cdot (0,67) \cdot (1) \cdot (1) \cdot (1)$$

$$W_i(c) = 10,23$$

El consumo específico de energía se obtiene con la expresión 3.2

$$W = W_i(c) \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right]$$

Con los tamaños de las partículas a la entrada y salida se tiene:

$$F80 = 2\,000 \quad \mu\text{m}$$

$$P80 = 180 \quad \mu\text{m}$$

Entonces la energía específica es:

$$W = 10,23 \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{180}} - \frac{10}{180} \right]$$

$$W = 5,34 \cdot \text{kWh/Tc}$$

La potencia mecánica para operar el molino, es con la expresión 3.3

$$P_m = 5,34 \cdot (55)$$

$$P_m = 293,7 \text{ kW}$$

3.6.2 Dimensiones del molino

3.6.2.1 Diámetro

Se determina con la expresión 3.5 y los siguientes datos:

Factor Kr	4,487 x10 ⁻⁵
Porcentaje de bolas en el molino	30%
Porcentaje de la velocidad crítica	65%
Relación (L/D)	1
Porcentaje de llenado con bolas	30

$$D_B = \left(\frac{211}{4,067 \times 10^{-5} \cdot (1,7) \cdot 30^{0,555} \cdot 65^{1,505}} \right)^{\frac{1}{3,5}} = 8 \text{ pies}$$

Reemplazando los valores correctamente en la ecuación se determina que el diámetro del molino de bolas debe ser de $D_B = 8$ pies.

3.6.2.2 Longitud

Con la relación (L/D) de 1, la longitud del molino resulta:

$$L = 8 \text{ pies}$$

Para la molienda secundaria se selecciona un molino de bolas cuyas dimensiones es de 8'x8'

3.6.2.3 Velocidad de giro del molino de bolas

La velocidad crítica se obtiene con la expresión 3.6

$$N_c = \frac{76,63}{\sqrt{8}}$$

$$N_c = 27,1 \text{ rpm}$$

Considerando un factor de velocidad crítica de 0,65 resulta:

$$n_c = 0,65 \cdot 27,1$$

$$n_c = 17,6 \text{ rpm}$$

En la Fig. 3.7 se muestra la ubicación del engranaje y el piñón. Como el engranaje esta unido al cuerpo cilíndrico, la velocidad del molino de bolas es igual a la velocidad del engranaje:

$$n_g = 17,6 \text{ rpm}$$

El eje del piñón se acopla con el reductor de velocidad que finalmente se conecta con el motor.

3.6.2.4 Características de la transmisión

El esquema de la transmisión se muestra en la Fig. 4.8. Se observa que el engranaje va montado sobre el cuerpo cilíndrico que se apoya sobre los muñones del molino. El piñón va montado en un eje que se apoya en dos rodamientos.

El eje del piñón se acopla con el reductor de velocidad que finalmente se conecta con el motor.

Potencia requerida por el molino : 293,7 kW

Eficiencia de la transmisión

$$\eta_e = 0,98$$

$$\eta_r = 0,99$$

Aplicando la expresión 3.35

$$\eta_{tm} = \eta_e \cdot \eta_r^2$$

$$\eta_{tm} = 0,98 \cdot 0,99^2$$

$$\eta_{tm} = 0,96$$

La potencia mecánica en el eje del piñón de ingreso con la ecuación 3.36 resulta:

$$Pmp = \frac{293,7}{0,96}$$

Las características del engranaje son:

Tipo Engranaje simple helicoidal

Angulo de presión θ 20°

Número mínimo de dientes del piñón Z_p 16

Módulo mínimo m 16

Angulo de hélice: ψ mínimo 15

ψ máximo 25

Distancia entre centros 1 594 mm

Con estos valores y las expresiones 3.7, se analizan cinco alternativas cuyos resultados se dan en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Determinación de los parámetros de la transmisión de molino de 8x8

Alternativa	$Z_p + Z_g$	m	Z_p	Z_g	i	ψ (Grados)
1	224	16	17	207	12.18	24.49
2	225	16	17	208	12.24	23.93
3	226	16	17	209	12.29	23.34
4	227	16	17	210	12.35	22.75
5	228	16	17	211	12.41	22.14

De la tabla 3.3 se selecciona la alternativa 1 con los resultados siguientes:

Módulo	m	:	16	
Número de dientes del piñón	Z_p	:	17	Dientes
Número de dientes del engranaje	Z_g	:	207	Dientes
Relación de transmisión	i	:	12,18	
Angulo de la hélice	ψ	:	24,49	grados

Diámetro del piñón, expresión 3.9

$$D_p = \frac{m \cdot Z_p}{\cos(\psi)} \quad D_p = \frac{16 \cdot (17)}{\cos(24,49)}$$

$$D_p = 299 \text{ mm}$$

Diámetro del engranaje expresión 3.10

$$D_g = D_p \cdot i \quad D_g = 299 \cdot 12,18$$

$$D_g = 3\,640 \text{ mm}$$

Velocidad del piñón expresión 3.11

$$N_p = i \cdot N_g \quad N_p = 12,18 \cdot 17,6$$

$$N_p = 216 \text{ rpm}$$

Velocidad tangencial del piñón expresión 3.12

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n_p}{60 \cdot 1000} \quad V_p = \frac{\pi \cdot 299 \cdot 216}{60 \cdot 1000}$$

$$V_p = 3,38 \text{ m/s}$$

Ancho de diente Expresión 3.13

$$F_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{\text{sen}(\psi)} \quad F_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot 16}{\text{sen}(24,49)}$$

$$F_c = 242 \text{ mm}$$

Se establece un ancho de diente de:

$$F_c = 380 \text{ mm}$$

Torque, expresión 3.14

$$T_p = \frac{9540 \cdot P_t}{N_p} \quad T_p = \frac{9540 \cdot 306}{216}$$

$$T_p = 13\,505 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Fuerza tangencial expresión 3.15

$$W_{tp} = \frac{2 \cdot T_p}{D_p} \quad W_{tp} = \frac{2 \cdot 13\,505}{299}$$

$$W_{tp} = 90\,368 \text{ N}$$

3.6.2.5 Esfuerzos por flexión

Se consideran los siguientes factores:

Factor de vida, para 10^7 ciclos	KL	0,94
Factor de temperatura	KT	1,00
Factor de seguridad	KR	1,00
Factor geométrico	Jp	0,451
Factor dinámico	Kv	0,866
Factor de tamaño	KS	1,00
Factor de distribución de carga	Km	2,00
Factor de sobrecarga	Ko	1,25
Factor geométrico de engranaje	Jg	0,58
Factor de espesor de aro	KB	1,00

Módulo en el plano transversal expresión 3.22

$$mt = \frac{2 \cdot m}{\cos(\psi)} \qquad mt = \frac{2 \cdot (16)}{\cos(24,49)}$$

$$mt = 17,58$$

Esfuerzo por resistencia a la flexión del piñón expresión 3.23

$$S_{tp} = \frac{Wt \cdot Ko \cdot Ks \cdot KB \cdot Km}{F \cdot mt \cdot Kv \cdot Jp} \qquad S_{tp} = \frac{88\,303 \cdot (1) \cdot (1) \cdot (2) \cdot (1)}{(380) \cdot (17,27) \cdot (0,451) \cdot (0,866)}$$

$$S_{tp} = 86 \text{ MPa}$$

- Selección del material para el piñón

Acero bonificado AISI 4340 - 240 HBN

Esfuerzo por flexión $S_{atp} = 210 \text{ MPa}$

Esfuerzo de contacto $S_{acp} = 720 \text{ MPa}$

Dureza mínima superficial 240 BHN

- Esfuerzos admisibles ajustados en la raíz del piñón, expresión 3.24

$$S'atp \geq Satp \cdot \left(\frac{KL}{KT \cdot KR} \right) \quad S'atp = 210 \cdot \left(\frac{0,93}{1,1} \right)$$

$$S'atp = 197 \text{ MPa}$$

Cumple con la condición, expresión 3.25

$$197 > 86$$

Esfuerzos por resistencia a la flexión en el engranaje

- Esfuerzos calculados en el engranaje, en 3.26

$$Stg = Stp \cdot \left(\frac{Jp}{Jg} \right) \quad Stg = 86 \cdot \left(\frac{0,45}{0,58} \right)$$

$$Stg = 67 \text{ MPa}$$

Acero fundido ASTM 148 GRADO 80 -50 200 HBN

Esfuerzo por flexión $Satg = 200 \text{ MPa}$

Esfuerzo de contacto $Sacg = 700 \text{ MPa}$

Dureza mínima superficial 200 BHN

Cumple con la condición de la expresión 3.27

$$200 \geq 67$$

3.6.2.6 Esfuerzos por contacto

Factor por propiedades elásticas	Cp	58
Factor de sobrecarga	Co	1,25
Factor de distribución de carga	Cm	2,00
Factor de tamaño	Cs	1,00
Factor de condición superficial	Cf	1,10
Factor geométrico	I	0,242
Factor dinámico	Cv	0,66
Factor de vida	CL	0,90

Factor de relación de dureza	CH	1,02
Factor de temperatura	CT	1,00
Factor de seguridad	CR	1,00

Esfuerzo por contacto en el piñón, reemplazando en 3.28:

$$S_C = C_P \cdot \sqrt{\frac{Wt \cdot C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f}{D_p \cdot F \cdot J \cdot C_v}}$$

$$S_C = 58 \cdot \sqrt{\frac{83\,303 \cdot 1,25 \cdot 1,0 \cdot 2,0 \cdot 1,1}{0,294 \cdot 0,35 \cdot 0,244 \cdot 0,66}}$$

$$S_C = 0,214 \text{ MPa}$$

$$720 \geq 0,215 \text{ Aceptable}$$

Esfuerzos de contacto en el engranaje, reemplazando en 3.39

$$S'_{cg} = S_C \left(\frac{CL \cdot CH}{CT \cdot CR} \right) \quad S'_{cg} = 0,214 \left(\frac{0,90 \cdot 1,02}{1,0 \cdot 1,0} \right)$$

$$S'_{cg} = 0,196$$

$$700 \geq 0,196 \text{ Aceptable}$$

3.6.2.7 Potencia que pueden transmitir la transmisión

a) Cálculo por fatiga superficial (desgaste), reemplazando en 3.30

$$P = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{np \cdot F \cdot C_v \cdot J}{C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f} \right) \cdot \left(\frac{Sag \cdot D_p \cdot CL \cdot CH}{C_P \cdot CR \cdot CT} \right)^2$$

$$P = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{225 \cdot 350 \cdot 0,66 \cdot 0,242}{1,25 \cdot 1,0 \cdot 1,6 \cdot 1,1} \right) \cdot \left(\frac{71 \cdot 294 \cdot 0,90 \cdot 1,02}{58 \cdot 1,0 \cdot 1,0} \right)^2$$

$$P = 361 \text{ kW}$$

$$361 > 306 \text{ Aceptable}$$

La potencia que puede transmitir la transmisión es mayor que la máxima requerida.

b) Cálculo por resistencia a la fatiga por flexión.

Potencia que puede transmitir el piñón

Se determina con: (3.31)

$$P_p = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{D_p \cdot n_p \cdot m_t \cdot F \cdot J_p \cdot K_L \cdot K_v \cdot S_{atp}}{K_T \cdot K_R \cdot K_m \cdot K_o} \right)$$

$$P_p = 6,98 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{294 \cdot (21,4) \cdot 225 \cdot (17,27 \cdot (380)) \cdot 0,45 \cdot (0,93) \cdot 0,86}{1 \cdot (1) \cdot 1 \cdot (2) \cdot 1 \cdot (1)} \right)$$

$$P_p = 729 \text{ kW}$$

Se verifica con 3.32 que:

$$729 > 306 \text{ Aceptable}$$

c) Potencia transmitida por el engranaje

Con 3.33 se tiene:

$$P_{fg} = P_p \cdot \left(\frac{J_g}{J_p} \right) \quad P_{fg} = 731 \cdot \left(\frac{0,58}{0,45} \right)$$

$$P_{fg} = 940 \text{ kW}$$

Se verifica con 3.34 que:

$$940 > 306 \text{ Aceptable.}$$

3.6.3 Selección del reductor de velocidad motor eléctrico

a) Relación de velocidad

El piñón gira a 260 rpm y transmite 306 kW. Se utiliza un motor eléctrico que gira a 1728 rpm por lo que se requiere un reductor de velocidad que tenga una relación de transmisión

$$i = \frac{n_m}{n_p} \quad i = \frac{1728}{216}$$

$$i = 8$$

b) Reductor de velocidad

El sistema de transmisión se ubica en el lado izquierdo del molino para que el sistema de bombeo y la zaranda puedan instalarse en el lado derecho del molino.

Se consideran reductores de engranajes normalizados marca FELLAR- Las características de los engranajes se presenta en la tabla 4.35 ver (anexo).

El modelo TH2-560 tiene una relación de transmisión $i_n = 8$ con dos escalones de reducción y una eficiencia de 92 % y puede transmitir 360 kW a una velocidad de salida de 185 rpm.

Con estos datos se determina que el torque máximo que puede transmitir que es de 18 564 N-m.

El piñón del molino gira a 216 rpm y transmite una potencia de 306 kW, con un par de 12 965 N-m.

Se selecciona el reductor de velocidad:

Marca	FELLAR
Modelo	TH2-560
Ejecución	DI
Relación de transmisión	8
Potencia máxima del reductor	360 kW

c) **Motor Eléctrico**

El reductor de velocidad seleccionado tiene dos etapas de reducción con una eficiencia de transmisión de 92 %. Por lo que la potencia del motor eléctrico, con la expresión 3.37 resulta:

$$P_{me} = \frac{P_p}{\eta_{tr}} \qquad P_{me} = \frac{306}{0.92}$$

$$P_{me} = 332 \text{ kW}$$

Se selecciona un motor eléctrico asíncrono trifásico de alta eficiencia, el cual va a operar a una altura menor a 1000 msnm, que tiene las siguientes características

Tipo de motor W22 Fundición de hierro IE – 2

Número de polos	4
Carcasa	355 M/L
Potencia	370 kW
Tensión	400 V
Frecuencia	60 Hz
Fases	3

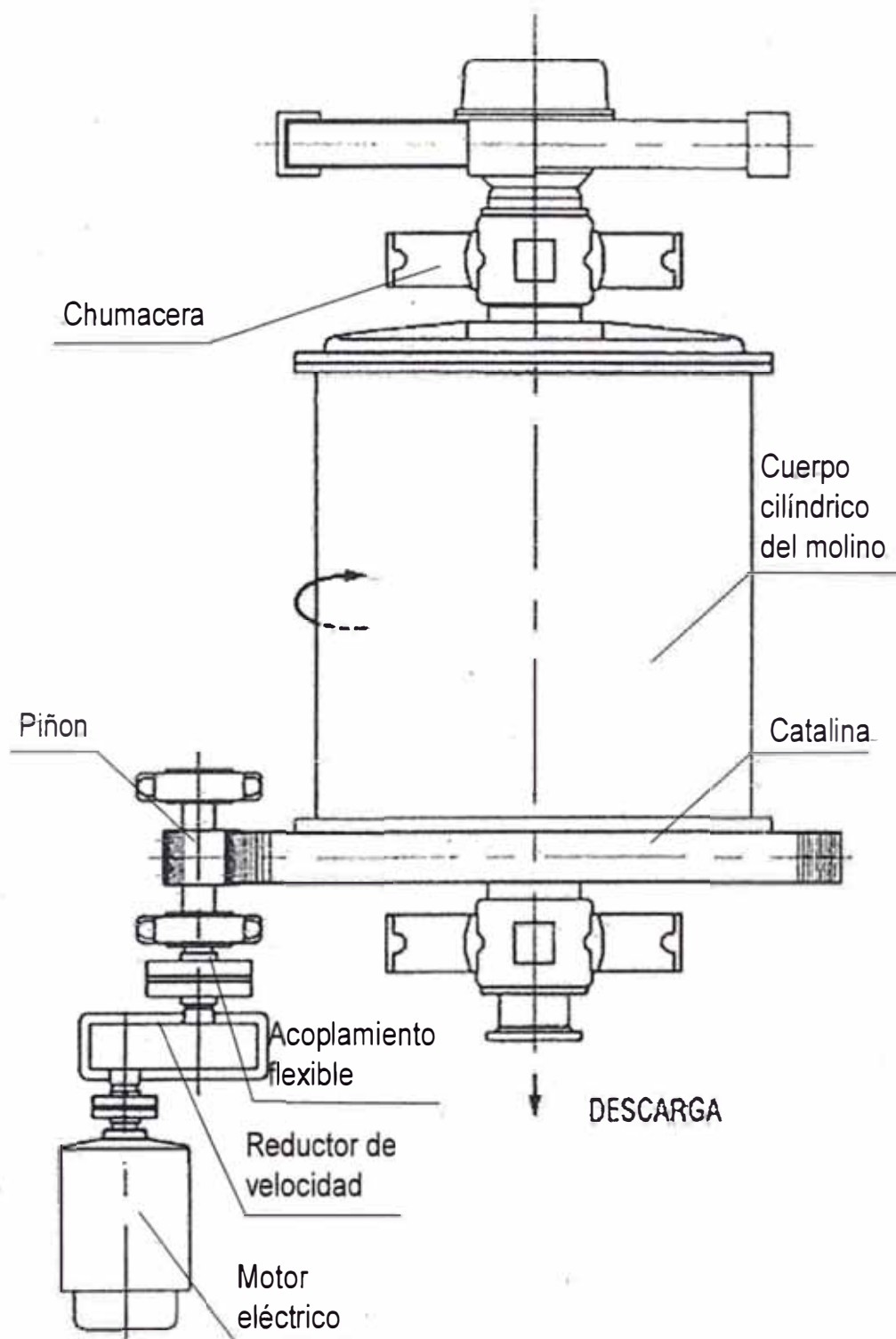


Fig. 3.8 Molino de bolas, montaje izquierdo

Disposición de los molinos

La disposición de los molinos de barras y bolas, el sistema de transmisión y el motor eléctrico se muestra en la Fig.3.9. ver planos en anexos.

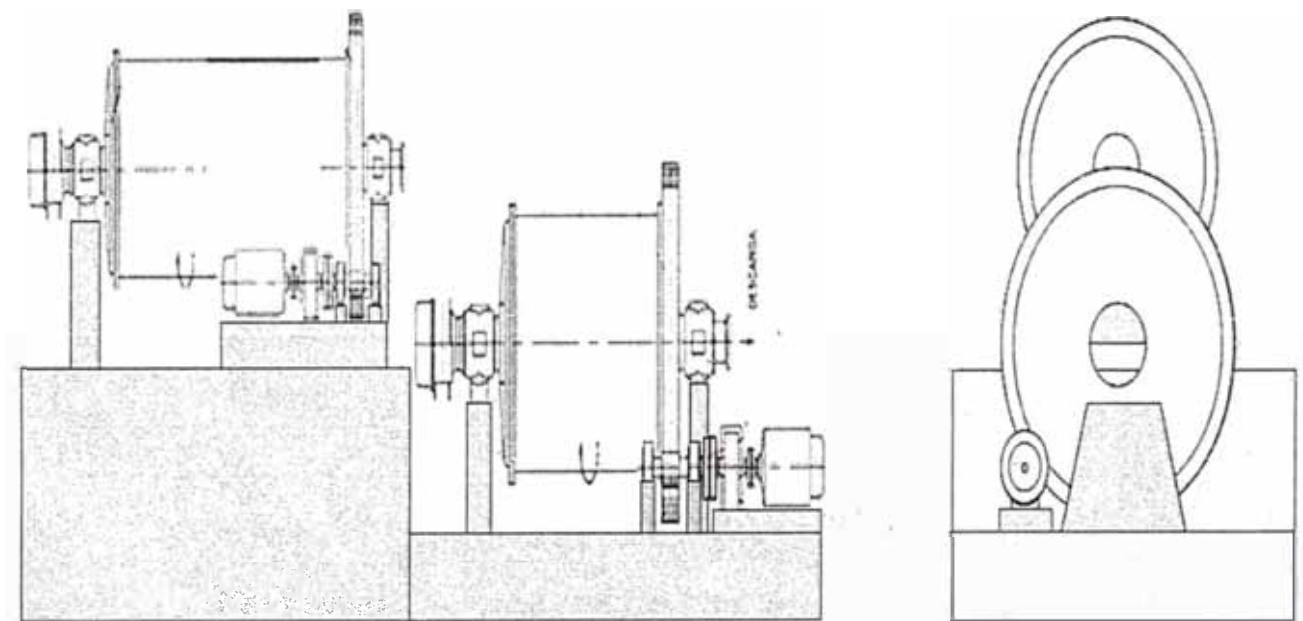


Fig. 3.9 Vista de corte de instalación de molinos

3.7 ZARANDA DE ALTA FRECUENCIA

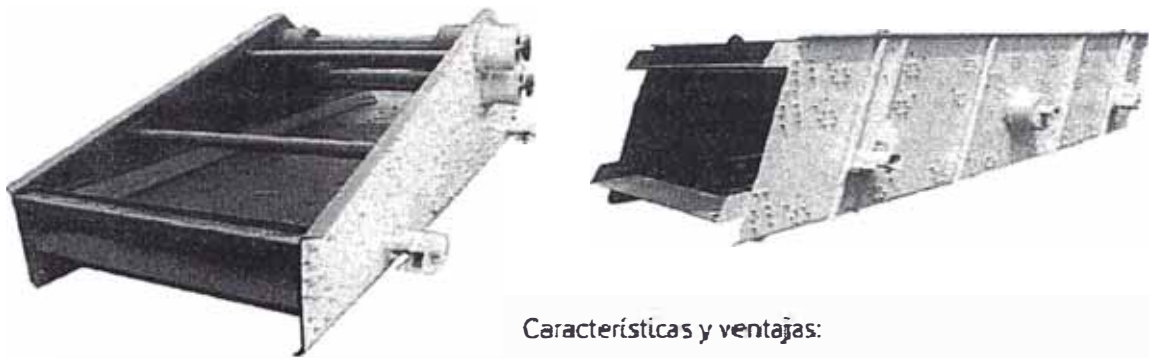
Las multizarandas pueden separar partículas de varios tamaños para lo cual pueden tener de una hasta 8 cribas. En este caso solo se requiere separar partículas de dos tamaños por lo que se utiliza una zaranda de una sola criba.

Características técnicas requeridas

Se requiere separar las partículas con un tamaño de 0.18 mm o menos. Las partículas de mayor tamaño se retornan para la remolienda.

Se selecciona una zaranda vibratoria de 75 t/h de capacidad, cuyas características son:

Marca	TECMAQ
Modelo	YK1235
Material	Húmedo
Tipo	Zarandas, con 1 zarandas en paralelo
Inclinación	20 grados.
Dimensiones	3 710x2 464x1450
Tipo de motor	Inducción jaula de ardilla.
Potencia	5,5 kW



Características y ventajas:

1. Fuerte fuerza de vibración con estructura excéntrica única;
2. La barra y la caja de filtro son conectadas con pernos de gran fuerza sin soldadura;
3. Estructura simple, mantenimiento fácil.
4. Adopta copulación de llanta; la conexión suave hace estable la operación;
5. Eficiencia alta, gran capacidad, duradera.

Fig. 3.10 Zarandas TEMAC con un tamiz.

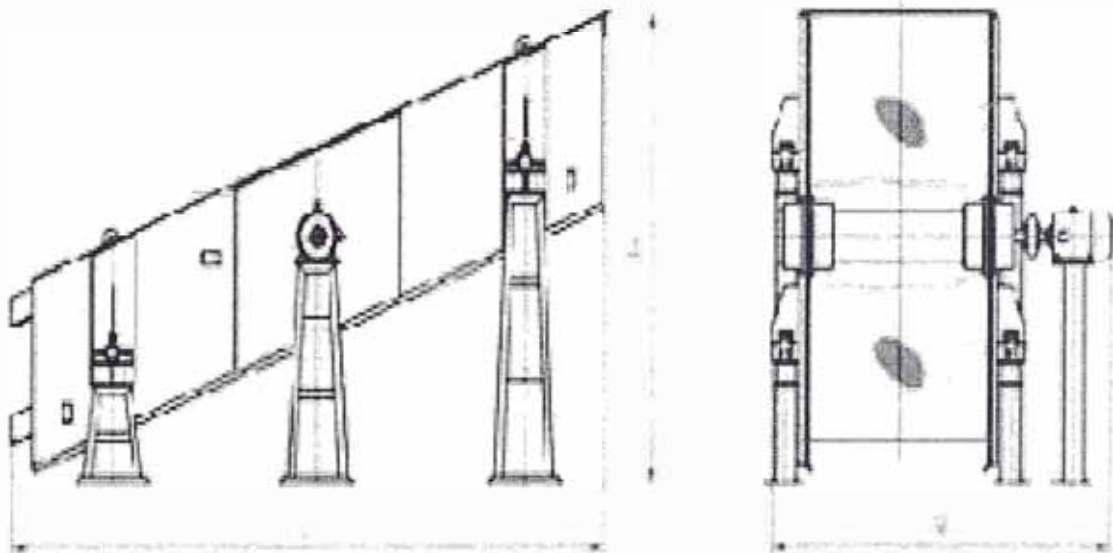


Fig. 3.11 Geometría de Zaranda de una criba

3.8 SISTEMA DE BOMBEO DE PULPA

El sistema de bombeo de pulpa que opera con un caudal de $135 \text{ m}^3/\text{h}$. se muestra en la Fig. 3.12

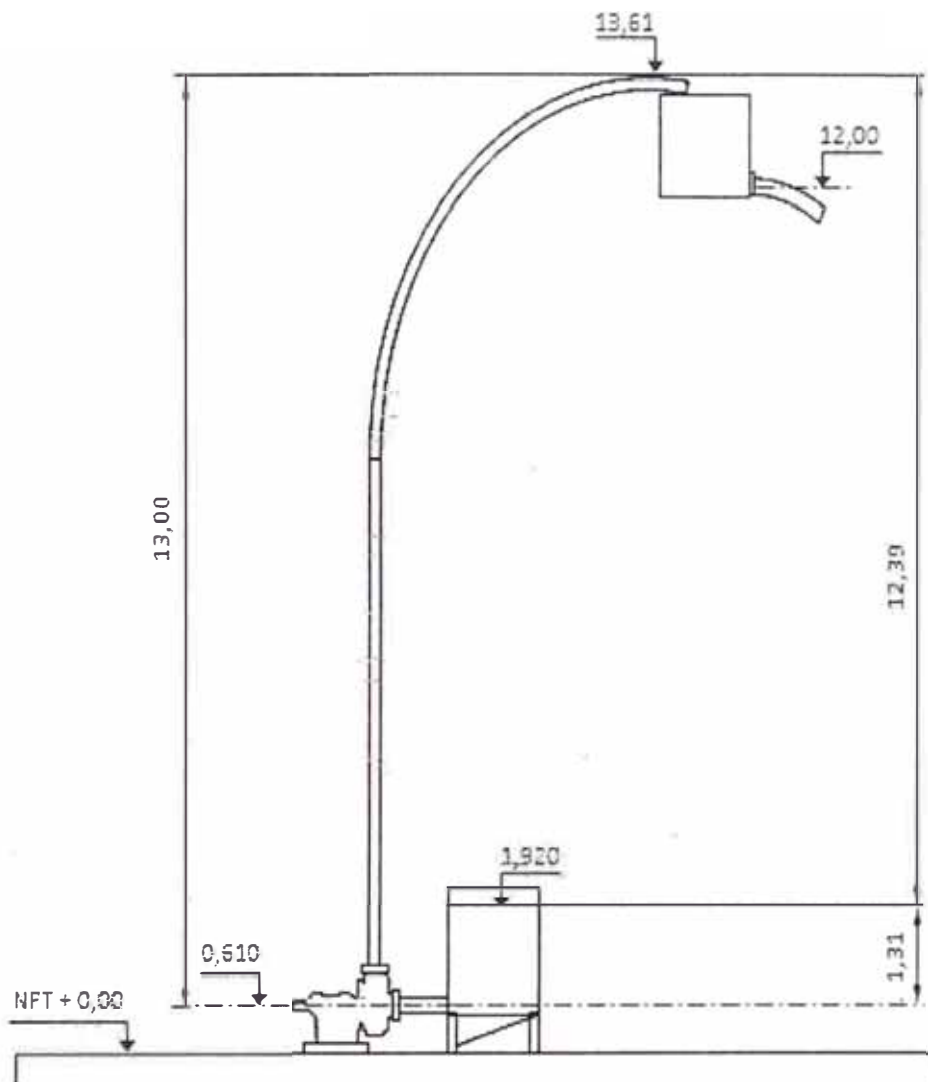


Fig. 3.12 Esquema del sistema de bombeo.

En la figura 3.12 se tiene con referencia al nivel del piso terminado:

Altura de eje de bomba	0,61	m
Nivel de pulpa en la succión	1,92	m
Altura estática de la tubería	13,2	m

3.8.1 Tanque de succión de la bomba

Este tanque es de acero ASTM A36, tiene la forma de un paralelepípedo que opera a presión atmosférica y tiene un volumen de 2 m^3 cuyas dimensiones son las siguientes:

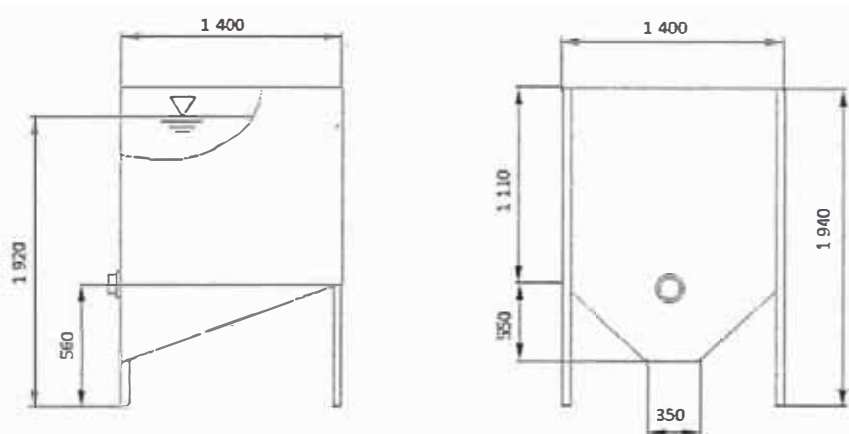


Fig. 3.13 Tanque de succión de pulpa.

3.8.2 Tanque de estabilización de zaranda

Este es un tanque cilíndrico de acero ASTM A36 de 2 m^3 de capacidad que recibe la pulpa por la parte superior y la descarga por la parte inferior a la alimentación de la zaranda vibratoria.

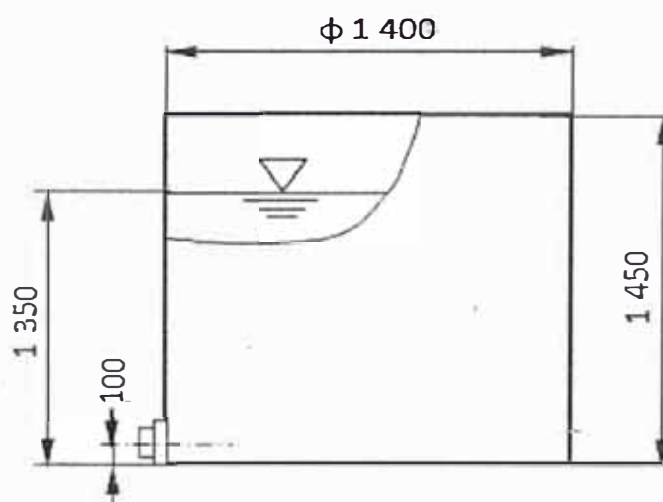


Fig. 3.14 Tanque de estabilización de flujo de pulpa para zaranda.

3.8.3 Selección de la tubería

Para las condiciones de molienda el caudal de pulpa que se debe bombear es de 136 m³/h.

Considerando una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) de alto peso molecular de Clase 10 de 122,2 mm de diámetro interior y con los datos siguientes:

$$FL = 1,04$$

$$Sw = 2,1$$

$$St = 1$$

Remplazando en 3.38 se tiene:

$$VL = 1,04 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 122 \cdot (2,1 - 1)}{1}}$$

$$VL = 2,07 \text{ m/s}$$

La velocidad mínima admisible de la pulpa en la tubería es de 2,07 m/s. Si la velocidad es menor se produce sedimentación de partículas sólidas en la tubería.

La pulpa que sale del molino es diluida para obtener una pulpa con densidad adecuada para ser bombeada por lo que resulta un caudal de 136 m³/h equivalente a 38 L/s por lo que la velocidad real de la pulpa en la tubería se

calcula con: $v = 1\,273 \cdot \left(\frac{38}{di^2}\right)$

Con estos datos se tiene con la expresión 3.39:

$$v = 1\,273 \cdot \left(\frac{38}{(122,2)^2}\right) \quad v = 3,21 \text{ m/s}$$

Como la velocidad de la pulpa en la tubería está comprendida en el rango de velocidades utilizable de 0,5 a 8 m/s y es mayor que la velocidad mínima admisible, el diámetro de la tubería seleccionado es aceptable.

Pérdidas en la tubería

La tubería tiene un tramo recto de 7,59 m y uno curvo de 5 m de radio con una longitud total de tubería de 13,84 m a la que se le suma la pérdida por el codo que equivale a 3,35 m totalizando una longitud equivalente de 17,19 m

Pérdidas por fricción

Estas pérdidas se obtienen con la ecuación de Darcy- Weisbach

$$H_f = f \cdot \frac{Le}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

El factor de fricción se obtiene con el diagrama de Moody, considerando una tubería de polietileno de alta densidad que tiene una rugosidad absoluta de 0,0015 mm: Se selecciona una tubería de diámetro:

$$D = 0,1222 \text{ m}$$

La velocidad del flujo de pulpa es: $v = 3,21 \text{ m/s}$

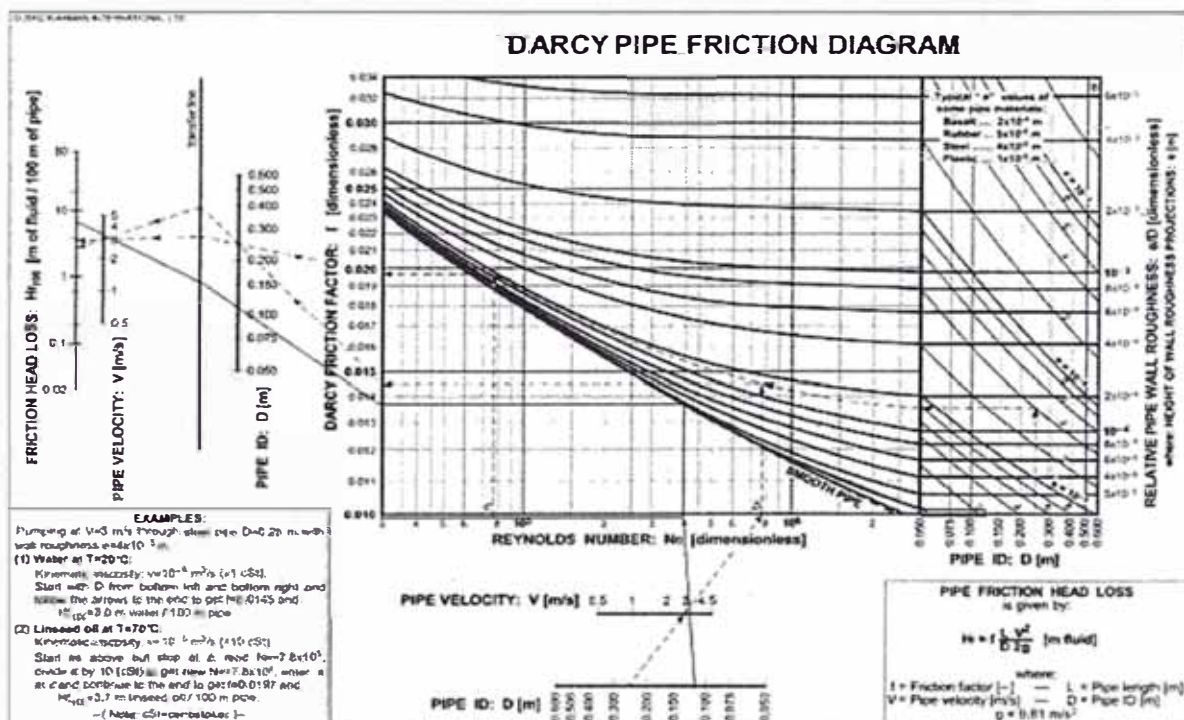


Fig. 3.15 Diagrama de Moody.

Gráficamente se obtiene:

$$f = 0,0138$$

Entonces con la expresión 3.41 se tiene.

$$Hf = 0,0138 \cdot \frac{17,19}{0,122} \cdot \frac{3,21^2}{2 \cdot 9,81} \quad Hf = 1,04 \text{ m}$$

- **Pérdidas en transición de ingreso a la tubería en el tanque de succión.**

Con la expresión 3.42 resulta:

$$\text{Velocidad antes de la transición} \quad Va = 0.038 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad después de la transición} \quad Vd = 2,8 \text{ m/s}$$

$$Htr = \frac{0,55}{2 \cdot 9,81} \cdot (2,8^2 - 0.038^2) \quad Htr = 0,21 \text{ m}$$

- **Pérdidas en la succión**

Con la expresión 3,43 resulta:

$$Hs = 0,5 \cdot \frac{2,8^2}{2 \cdot g} \quad Hs = 0,20 \text{ m}$$

- **Pérdidas en la descarga**

Estas se calculan con 3.44:

$$Hd = \frac{2,44^2}{2 \cdot g} \quad Hd = 0,40 \text{ m}$$

- **Altura de pérdidas**

Reemplazando las pérdidas anteriores en 3.45 se tiene las pérdidas totales:

$$Hft = 1,02 + 0,21 + 0,20 + 0,40 \quad Hft = 1,83 \text{ m}$$

- **Altura dinámica total**

Sumando las pérdidas a la altura geométrica se tiene según 3.46:

$$Hm = (13,0 - 1,92) + 1,83 \quad Hm = 13,11 \text{ m}$$

- **Corrección para obtener la altura dinámica en metros de agua**

Los cálculos anteriores se realizaron considerando las alturas medidas en metros de pulpa. Los fabricantes de bombas presentan datos de las bombas en metros de agua, por lo que para seleccionar la bomba se requiere obtener la altura dinámica total equivalente en metros de agua.

Para este caso se tiene:

$$HR = 0,75$$

Remplazando en 3.47:

$$Hda = \frac{13,11}{0,75} \quad Hda = 17,5 \text{ m (57,4 pies)}$$

3.8.4 Selección de la bomba

Con los datos siguientes se tiene:

$$\gamma = 2,65$$

$$Q = 600 \text{ GPM}$$

$$Hda = 17,5$$

$$\eta_b = 70 \%$$

Remplazando en 3.48 se tiene:

$$P_b = \frac{2,65 \cdot 600 \cdot 17,50}{3 \cdot 960 \cdot 0,7} \quad P_b = 10,02 \text{ BHP}$$

- **NSPH**

Considerando que la altura de la instalación está a 800 msnm y que la Temperatura media es de 20 °C se tiene:

$$H_a = 92218 \text{ Pa}$$

$$H_v = 2352 \text{ Pa}$$

$$\gamma = 25 \, 505 \text{ N/m}^3$$

$$Z_s = 1,31 \text{ mcp}$$

Las pérdidas en la tubería de aspiración es: $H_{fs} = 0,40 \text{ mcp}$

Remplazando estos valores en la expresión 3.49 se tiene el NSPH expresado en metros de columna de pulpa:

$$NSPH_a = \frac{92\,218 - 2\,532}{2,25\,505} + 1,31 - 0,40$$

$$NSPH_p = 4,3\, mcp$$

Este NSPH se convierte en metros de columna de agua con:

$$NSPH_a = \frac{4,3}{0,75}$$

$$NSPH_a = 5,9\, mca$$

Se selecciona una bomba Warman 6/4 AH cuyas curvas de comportamiento se muestran en la Fig.3.16 y sus características técnicas son:

Marca-	WARMAN	
Modelo	6/4 AH	
Altura	17,5	m(57,4 pies)
Caudal	600	m ³ /h
Velocidad de giro-	864	rpm
Dimensiones	3 710 x2 464x 1 450	mm
Tipo de motor	Inducción jaula de ardilla.	
Potencia	10	BHP

El NSPH requerido por la bomba es de 4.5 m, valor menor al NSPH disponible de la instalación, por lo que la selección es aceptable.

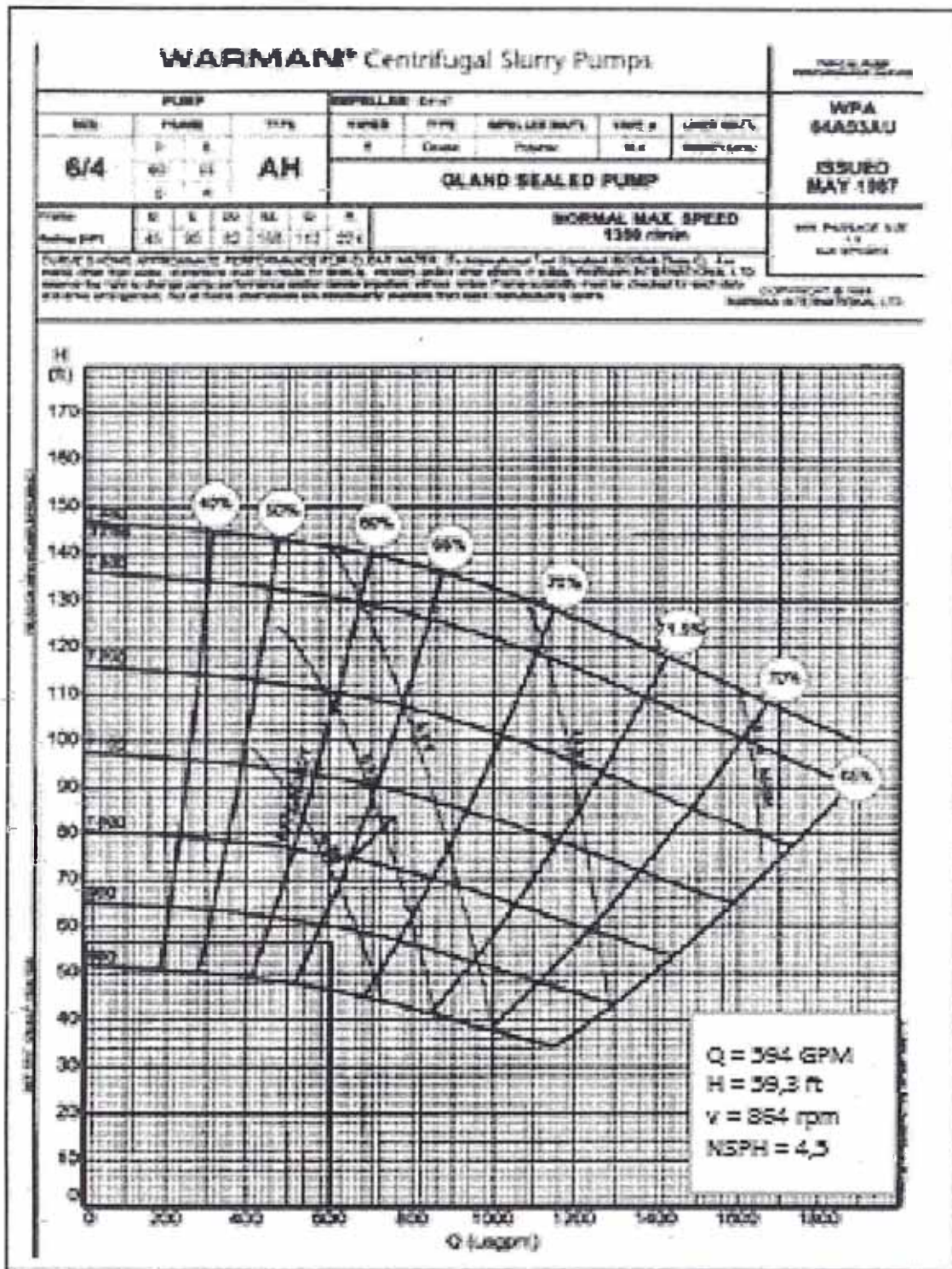


Fig. 3.16 Punto de operación de la bomba Warman 6/4 AH

CAPITULO 4

COSTOS

4.1 COSTOS DE EQUIPOS ELECTROMECHANICOS

Para la evaluación de los costos presento dos opciones.

1. Si se consideran solo los costos de inversión de los equipos mecánicos y electromecánicos detallados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1

Descripción	Cantidad	unitario US\$	total US\$
Molino de barras 7'x12' marca Marcy (*)	1	320 000	320 000
Molino de Bolas 8'x8' marca Marcy (*)	1	380 000	380 000
Bomba de Pulpas de H = 18,1m y Q = 600 m ³ /h	2	36 000	72 000
Zaranda vibratoria, de 1 criba y 75 t/h	1	15 000	15 000
Tanque de succión de acero 1,4x1,4x1,9 de 2 m ³	1	5 000	5 000
Tanque de zaranda de $\phi = 1,4$ y h = 1,5 de 2 m ³	1	4 000	4 000
Tuberías y accesorios	Global		10 000
Mangueras, bridas y otros	Global		5 000
TOTAL		US\$	811 000

El costo total de inversión será de: 811 000 US\$.

2. Para la segunda opción recomendando con la ayuda de expertos y colegas dedicados a este rubro se encontró el costo total considerando en rasgos generales también los costos de obras civiles y montaje.

Costo de equipos e instalaciones

Descripción	Cantidad	unitario US\$	total US\$
Molino de barras 7'x12' marca Marcy (*)	2	320 000	640 000
Molino de Bolas 8'x8' marca Marcy (*)	2	380 000	760 000
Bomba de Pulpas de H = 18,1m y Q = 600 m ³ /h	2	36 000	72 000
Zaranda vibratoria, de 1 criba y 75 t/h	2	15 000	30 000
Tanque de succión de acero 1,4x1,4x1,9 de 2 m ³	1	5 000	5 000
Tanque de zaranda de $\phi = 1,4$ y h = 1,5 de 2 m ³	1	4 000	4 000
Equipos e instalaciones	Global		10 000
Mangueras, bridas y otros	Global		12 000
TOTAL		US\$	1498 000

Costo de obras civiles

Item	Descripción	Cantidad	unitario US\$	total US\$
1	Estudios de suelos	1	4000	4000
2	Movimiento de tierras	Global	8000	8000
3	Cimentación de molino de barras	2	70000	140000
4	Cimentación molino de bolas	2	80000	160000
5	Cimentación de zaranda	1	8000	8000
6	Edificio	1	350000	350000
7	Otras instalaciones	1		10000
	TOTAL		US\$	680000

Costo de montaje

El costo total del montaje de los equipos de la planta asciende a 55 000 US\$.

En consecuencia el costo total de inversión sería de: 2 233 000 US\$.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta tesis que presento es el desarrollo de un proyecto minero real, que me ha facilitado tomar datos y ver los problemas de la sección de molienda..

Personalmente me ha permitido lograr una experiencia y satisfacción profesional ya que con este material no solo apporto a la solución de problemas en dicha sección si no que servirá como información a futuros proyectos, a estudiantes, profesionales y empresarios dedicados a este rubro.

CONCLUSIONES

A la finalización del estudio se ha llegado a las siguientes conclusiones.

- 1 El molino de barras debe ser de 7'x12' equipado con un reductor de velocidad de relación de reducción de 8,6:1 y accionado por un motor eléctrico de cuatro polos y 260 kW.
- 2 El rango de velocidades de operación del molino de barras es de 17,4 a 22,6 rpm.
- 3 La velocidad de giro del molino de barras es de 21,3 rpm; este problema se resuelve al ajustar las relaciones de transmisión de los engranajes del molino de barras y el reductor de velocidad, adoptando en el molino una reducción de velocidad de 8,96:1 con la del reductor de velocidad de 8,6:1
- 4 El molino de bolas debe ser de 8'x8' equipado con un reductor de velocidad de relación de reducción de 8,0:1 y accionado por un motor eléctrico asíncrono de cuatro polos y 370 kW.
- 5 El rango de velocidades de operación del molino de bolas es de 16,3 a 21,1 rpm.

- 6 La velocidad de giro del molino de bolas es de 17,3; este problema se resuelve al ajustar las relaciones de transmisión de los engranajes del molino de bolas y el reductor de velocidad, adoptando en el molino una reducción de velocidad de 12,18:1 con la del reductor de velocidad de 8,0:1
- 7 El ajuste de la relación de transmisión de los molinos se realizan adoptando un módulo constante y el mínimo número de dientes del piñón, se varía el número de dientes del engranaje de modo que las relaciones geométricas de las ruedas dentadas tengan valores aceptables.
8. Se diseñó el tanque de succión de bomba en acero ASTM A36 de medidas 1.4x1.4x1.9 y de 2m³ de capacidad.
9. Se diseñó el tanque de estabilización de Zaranda en acero ASTM A36 de medidas $\phi = 1.4, h = 1.5$ y de 2m³ de capacidad
10. La zaranda vibratoria estándar seleccionada de una criba tiene una capacidad máxima de 75 t/h. Su capacidad es mayor que la requerida, pero al tener mayor área de cribado disponible se facilita la selección de materiales.
11. El sistema de bombeo está equipado con una bomba de pulpas que opera con una altura dinámica total de 17,5 m y un caudal de 600 GPM con una potencia de 10,38 BHP y un NSPH de 9,41 m de columna de agua.
12. Se seleccionó una tubería de polietileno de alta densidad de 122 mm de diámetro interior, la cual permite tener una velocidad del flujo de 3,41 m/s que es mayor a la velocidad mínima aceptable que es de 2,2 m/s. Esta diferencia de velocidades permite absorber reducciones del caudal en el sistema hasta del 35 % sin llegar a tener el problema de sedimentaciones sólidos en la tubería.
13. El costo total de la sección de la molienda asciende a **US\$811 000**

RECOMENDACIONES

1. Instalar 2 equipos en paralelo, uno en funcionamiento y el otro en stand by para que cuando se malogre o entre en mantenimiento la obra no se paralice.
2. Tener distintas alternativas de selección y disposición de planta
3. Tener áreas de accesibilidad para otros tipos de maquinaria a utilizar, por ejemplo para el mantenimiento que puede ser grúas puentes, para carga y descarga de materiales, canaletas de relaves.
4. Hacer periódicamente limpieza de los equipos y de la planta para que el slurry no vaya a afectar los equipos u ocasionar accidentes físicos.
5. Forrar los interiores de los molinos con chapas mecánicas para protegerlos y cambiarlos periódicamente.
6. Seleccionar los molinos y equipos de marcas conocidas cuyas eficiencias de trabajo estén garantizadas, por ejemplo para molinos tenemos de las marcas Marcy, Taylor, Xinhai, esta última tienen un mayor costo pero se caracterizan por tener un ahorro de energía entre el 20 al 30%
7. Es importante la capacidad de diseño de las otras áreas, por ejemplo de chancado, de flotación, de mantenimiento, etc. y las áreas libres que se deben mantener para expansiones futuras de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Alva D. Fortunato. "Diseño de Elementos de máquinas I y II". 2 Edición. Lima-Perú. 2006
- 2 Diseño de un molino de bolas, Disponible en:
<http://es.scribd.com/doc/72920807/DISENO-DE-UN-MOLINO-DE-BOLAS>
- 3 Emmanuel Tlazalo. "Calculo y diseño de engranes helicoidales" Universidad Veracruzana" Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Febrero 2011.
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32941/1/jaentlazalo.pdf>
4. Mori Tuesta "Cálculo y diseño de un molino de barras para procesar 50 t/h de mineral de cobre". Tesis de grado UNI. Lima 1985
5. Morón, Santiago. "Diseño de molino de bolas de 120 t/h". Tesis de grado UNI. Lima 1975.
- 6 Mott. Robert. "Diseño de elementos de máquinas". Ciudad de México. Cuarta Edición. 2006
- 7 Nicolini, Jorge. "Tablas y ábacos" Disponible en:
www.scribd.com/doc/172609361/01-Tablas-Abacos
- 8 Reductores normalizado Fellar. Catalogo FRT17-87 Disponible en:
http://www.fellar.es/ES/Estandar_1.html
- 9 SewEurodrive "CatalogoMotoredutori"Edición2002 Disponible en:
http://www.motorreductores.com/otros/2002_20Constant_20Speed_20Gear_motors.pdf
- 10 Warman Pumps. "Slurry pumps handbook" 2009 fifth edition electronic versionFebruary 2009.Disponibleen:
www.pumpfundamentals.com/.../WeirSlurryPumpin
- 11 Alcántara V. Juan R.Diseño práctico de un molino de bolas, México 2008