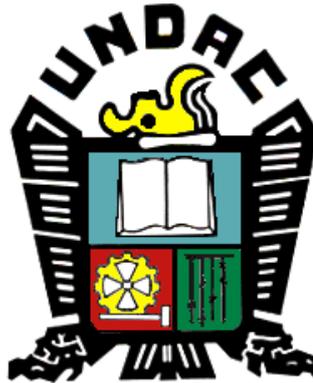


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA**



**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL
DISEÑO DE UN MOLINO DE BOLAS EN LA
EMPRESA ADMINISTRADORA CERRO S.A.C. -
PASCO - 2015”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA

PRESENTADO POR:

Bach. PERCY HUAMAN CALZADA

CERRO DE PASCO – PERU

2015

RESUMEN

En el desarrollo académico de las asignaturas en la Escuela de formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica se dicta el curso de Diseño de Planta I y II, en el cual se da énfasis a la selección de equipos o máquinas que se utiliza en una Planta Concentradora, lo cual me dio la idea de evaluar los parámetros que influyen en el diseño de un molino de bolas.

En la actualidad la minería se encuentra en recesión debido a la baja de los costos de compra venta de los concentrados de los minerales por parte de los mercados chinos y americanos, estos hechos hacen que las empresas mineras en nuestro país se ven afectadas en su producción de ello no está ajeno Volcan Compañía Minera y su concesionaria Empresa Administradora Cerro SAC., que muy probable en el mes de diciembre cierra sus operaciones en el tratamiento de minerales sulfurados pasando a tratar minerales oxidados. Por ello es necesario diseñar equipos que han de ser utilizados en sus operaciones.

La abundancia de las reservas de minerales oxidados constituye una disponibilidad de suministro durante mucho tiempo.

El propósito de esta Tesis, es el de desarrollar y describir el diseño de un molino de bolas y la aplicación de las ecuaciones que gobiernan este proceso.

DEDICATORIA

A MIS PADRES, QUE GRACIAS A SU SABIDURÍA INFLUYERON EN MI MADUREZ, PARA LOGRAR TODOS LOS OBJETIVOS EN LA VIDA, ES PARA USTEDES ESTA TESIS EN AGRADECIMIENTO POR TODO SU AMOR Y ABNEGACIÓN.

AGRADECIMIENTO

Mediante la presente expreso mis sinceros agradecimientos a:

- A Dios por darme salud y bienestar,

- A mis padres por darme lo mejor de mi vida que es la educación y profesión,

- A los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica por la orientación y apoyo recibido durante el desarrollo académico de mi persona. En especial al Ingeniero , asesor de la presente investigación quien me brindo toda su confianza y sugerencias para que esto se haga realidad.

- Al personal Staff y a los trabajadores de la Empresa Administradora Cerro S.A.C, por darme la oportunidad de realizar la presente investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1. Problema general	5
1.2.2. Problemas específicos	5
1.3. OBJETIVOS	
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. IMPORTANCIA Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	
1.4.1. Importancia	6
1.4.2. Limitaciones	7
1.5. JUSTIFICACIÓN	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES	8
2.2. MARCO CONTEXTUAL	11
2.3. BASES TEÓRICAS	
2.3.1. Molino de bolas	12
2.3.2. Operación	12
2.3.3. Eficiencias del molino	48
2.3.4. Parámetros del molino	49
2.3.5. Selección del molino	52
2.3.6. Capacidad y consumo de energía	53
2.3.7. Motor y Transmisión	55
2.3.8. Molino de bolas Allis Chalmers	55
2.3.9. Tipo de rebosamiento	56
2.3.10. Molino Koppers. Co. Inc.	57
2.3.11. Molino Harding	57
2.3.12. Molino Aerofall	58
2.3.13. Molino Rockcyi	59
2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	60
2.5. HIPÓTESIS	
2.5.1. Hipótesis General	61
2.5.2. Hipótesis específicos	61
2.6. VARIABLES	
2.6.1. Variable Dependiente	62

2.6.2. Variable Independiente	62
2.6.3. Variables Intervinientes	62

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	63
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	63
3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN	64
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	
3.4.1. Población	64
3.4.2. Muestra	65
3.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOLINOS	65
3.6. ELEMENTOS IMPORTANTES EN LA MOLIENDA	66
3.6.1. Velocidad crítica	66
3.6.2. Relaciones entre los elementos variables	68
3.6.3. Tamaño máximo de los elementos moledores	69
3.6.4. Volumen de carga	70
3.6.5. Potencia	71

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. DISEÑO DEL MOLINODE BOLAS	74
4.1.1. Cálculo de capacidad	74
4.1.2. Cálculo de potencia del motor	75

4.1.3. Selección del reductor de velocidad	76
4.2. EXPRESIÓN DE DAWN PARA DIMENSIONAMIENTO DEL MOLINO	77
4.2.1. Cálculo de la velocidad del molino	77
4.2.2. Volumen de carga y peso de la bola	78
4.2.3. Velocidad crítica de rotación	81
4.3. CANTIDAD Y TIPO DE CUERPOS MOLEDORES DISTRIBUIDOS EN LA CÁMARA DE MOLIENDA	83
4.3.1. Consideraciones de llenado	83
4.3.2. Grado de llenado de bolas en el molino	84
4.4. PRUEBAS DE HIPÓTESIS	100
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata de la “Evaluación de parámetros para el diseño de un molino de bolas”

El objetivo de este trabajo es el de establecer las consideraciones y aspectos necesarios en el desarrollo de evaluación de parámetros según el diseño de un molino de bolas, dando aplicabilidad al curso llevado en las aulas universitarias.

La finalidad del proceso de molienda es reducir en tamaño al mineral con un consumo de energía eficiente debido al incremento de área por unidad de volumen que se requiere en la flotación de minerales.

Para esta reducción de tamaño es necesario conocer la velocidad crítica del molino, la velocidad de operación, tipo de material moledora, sistema

de rodamientos y otros factores que hacen cierta complicación al momento de diseñar.

Para expresar la intención de la investigación manifiesto lo siguiente:

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, donde se ha considerado la descripción del problema, formulación del problema, los objetivos de la tesis, las hipótesis, las variables y la justificación e importancia de la tesis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO, donde se ha considerado los antecedentes de la investigación, marco histórico de los diversos molinos, seguido del marco teórico de los molinos

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS, se da a conocer la metodología que se aplica para la realización de la investigación y poder demostrar la investigación que si es factible realizar, así mismo captar la información necesaria para realizar los cálculos necesarios..

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS, en este capítulo se han considerado las evaluaciones de los parámetros

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se han desarrollado principalmente las conclusiones del estudio de investigación y dar sugerencias para continuar con la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad el mercado internacional da mayor interés a la compra de los concentrados de plomo, zinc, cobre y plata, haciendo que éstos productos incrementen su valor y el país ve reflejado en un sostenimiento económico aceptable y creíble, cada vez con mayores incrementos en la caja fiscal.

La Empresa Administradora Cerro S.A.C., se dedica a la exploración, explotación y beneficio de minerales por cuenta propia y de subsidiarias, correspondiéndole la extracción, concentración y tratamiento. La comercialización de todos los productos y concentrados. La duración de la empresa es de carácter indefinido, limitado a la disposición de reservas de mineral, lo cual a su vez puede variar en función de las inversiones que la compañía efectúe en exploraciones y a los resultados de éstas

Generalmente en las empresas mineras, el tratamiento del mineral se hace una rutina diaria controlando a cada instante el funcionamiento normal de los equipos y maquinarias para no verse perjudicado y/o pérdida de tiempo en la guardia al tratar de reparar o reemplazar a uno de ellos que presenta fallas.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La molienda es la última etapa del proceso de conminución, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión, ya sea en seco o como una suspensión en agua, también llamado pulpa. La molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como “medios de molienda”, los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas de mena.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente

se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Por supuesto, una sub-molienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación económica obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración. Sobre-molienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario, generalmente la ganga y puede reducir el tamaño de partícula del componente minoritario, generalmente el mineral valioso, bajo el tamaño requerido para la separación más eficiente. Además se pierde mucha energía, que es cara, en el proceso. Es importante destacar que la molienda es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral.

El movimiento de la carga en molinos es una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mena pero pequeñas con relación al volumen del molino, y que ocupan menos de la mitad del volumen del molino.

Cuando el molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino hasta que se logra una situación de

equilibrio dinámico donde los cuerpos de molienda caen en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento hasta el “pie” de la carga del molino. Se pueden distinguir tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio: a) rotación alrededor de su propio eje, b) caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos y c) caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el “pie” de la carga.

La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del molino y del tipo de revestimiento del molino. A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva.

En el plan curricular de la Escuela de Formación Profesional se dictan los cursos de diseño de plantas I y II, para desarrollar nuevas tecnologías que ha de servir para la empresa, mi intención es aplicar cada una de esas ecuaciones que se ha han desarrollado en el curso mencionado.

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Qué parámetros se debe evaluar para el diseño de un molino de bolas?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1. ¿Qué parámetros se debe tener en cuenta para el diseño de un molino de bolas?
2. ¿Qué componentes debe ser analizado para el diseño de un molino de bolas?
3. ¿Qué tipo de mineral debe ser tratado para desarrollar el diseño del molino de bolas?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación de parámetros para diseñar un molino de bolas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar los parámetros que se tendrá en cuenta para diseñar un molino de bolas.
2. Identificar los componentes que deben ser analizados para diseñar un molino de bolas.
3. Determinar el tipo de mineral que debe ser tratado para diseñar un molino de bolas.

1.4. IMPORTANCIA Y LIMITACIONES

1.4.1. IMPORTANCIA:

El presente estudio de investigación es un trabajo aplicado y netamente no experimental donde se hará el análisis cualitativo y cuantitativo en la aplicación de ecuaciones matemáticas que nos conllevará a conocer los parámetros necesarios para el diseño de un molino de bolas en las instalaciones de la Empresa Administradora Cerro S.A.C., y que la empresa sea favorecida tecnológicamente.

1.4.2. LIMITACIONES

La investigación a realizarse tendrá como la evaluación de parámetros en la sección molienda para el tratamiento de los minerales sulfurados en la Empresa Administradora Cerro S.A.C., teniendo en cuenta que la bibliografía es escasa en el mundo de la minería, así como también se llevará a cabo en un lapso de 6 meses de estudio.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación está enmarcada en el diseño de un molino de bolas en la Empresa Administradora Cerro S.A.C., es una investigación de índole tecnológica y aplicativa de ecuaciones matemáticas.

En su factibilidad económica podremos decir que sí es posible llevar a cabo esta evaluación toda vez que es de índole teórica, analítica, deductiva.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente estudio de investigación se desarrollara con el uso adecuado del diseño de plantas en especial la de un molino de bolas.

2.1. ANTECEDENTES

Al revisar la bibliografía encontramos varios tipos de molinos que se han ido empleado en la industria minera.

Molinos de varios compartimientos.

Los molinos de varios compartimientos ofrecen una molienda de material grueso hasta lograr el producto acabado en una sola operación, ya sea en húmedo o en seco. El compartimiento primario de molienda cuenta con bolas o vástagos grandes para la

trituration, mientras que uno o más compartimientos secundarios tienen medios más pequeños para una molienda más fina. Los diámetros varían de 1,5 a 4,9 m (5 a 16 ft), las longitudes ascienden a 16 m (52 ft) y la potencia a 3300 kW (4400 hp) con transmisión Twinducer. Los molinos de piedras dan productos finamente divididos que deben estar libres de contaminación de hierro. Se emplean con mucha frecuencia para triturar arena vítrea, arenas de alto grado para polvos de lavado, y aplicaciones en las industrias del talco o las cerámicas. La carga de molienda consiste en pequeñas piedras de pedernal. Los diámetros van de 0,9 a 2,7 m (3 a 9 ft), las longitudes de 1,8 a 8,5 m (6 a 28 ft). Los molinos de vástago Allis-Chalmers dan un producto de malla de 6 a 35 con una cantidad mínima de finos. Puesto que el molino de vástago utiliza un tamaño de ranura de dosificación de 2,5 cm (1 inch), ha reemplazado la última etapa de trituration en muchas plantas. El tipo de descarga periférica central se emplea profusamente para producir conglomerados de especificación fina, mezclas crudas de ladrillo y gránulos para techos. Los molinos de vástago construidos por Allis-Chalmers son del tipo periférico de extremo o central y vienen en las clases de rebosamiento para aplicaciones de moliendas en húmedo. La longitud de los molinos de vástago o varilla debe ser al menos 1,25 veces mayor que el diámetro de trabajo. El intervalo de diámetros es de 2,7 a 4,3 m (9 a 14 ft); las longitudes de 3,7 a 5,5 m (12 a 18 ft); y la potencia de 335 a 1040

kW (450 a 1400 hp) con transmisión directa; 930 a 3300 kW (1250 a 4440 hp) con transmisión Twinducer.

Molinos de tubo y Kennedy Van Saun

Los molinos de tubo y Kennedy Van Saun son de una construcción tal que permite funcionar a una capacidad mayor que la nominal en cada aplicación de molienda, ya sea húmeda o seca. Existen tamaños de 1,8 a 4,9 m (6 a 16 ft) de diámetro y 2,4 a 10 m (8 a 33 ft) de longitud para molinos de descarga mecánica; para molinos de rebosamiento en fase húmeda, de 1,5 a 4,5 m (5 a 15 ft) de diámetro y 2,1 a 7,6 m (7 a 25 ft) de longitud. Estos molinos son accionados por motores de 37 a 4500 kW (50 a 6000 hp).

Los sistemas de molienda Kennedy con barrido de aire y elevador activado con aire, se utilizan con mucha frecuencia para pulverizar carbón para plantas generadoras de energía, para encender hornos para cemento y hornos metalúrgicos, así como para la molienda de fosfatos y otros minerales. Estos sistemas muelen y secan simultáneamente los materiales en circuito cerrado con separadores de aire no mecánicos para la alimentación y el encendido de hornos de calcinación. Este sistema se puede ajustar para producir y mantener del 38 al 90 % de material que pasa por una malla 200, controlando los extremos fino y grueso. En el caso de

sistemas de encendido es factible usar el combustible más barato obtenible, por ejemplo, con un alto contenido de cenizas, humedad, poca molibilidad y bajo poder calorífico. El desgaste y el mantenimiento son reducidos y el material extraño no puede dañar al sistema.

Los molinos de vástago Kennedy se construyen en tamaños que van de 0,9 por 1,8 a 4 por 6,1 m (3 por 6 a 13 por 20 ft), tanto para molienda en húmedo como en seco.

Dado que los molinos de vástago o varilla evitan la formación de huecos, tienen una utilidad especial para reducir materiales húmedos o pegajosos. Por lo común, se emplean para producir materiales comprendidos en el intervalo de mallas del 6 al 20, aun cuando se obtienen con facilidad productos más finos y más gruesos. Sirven para moler minerales, escorias de cemento y muchos otros materiales.

2.2. MARCO CONTEXTUAL

Ubicación del proyecto:

- Región: Pasco
- Provincia: Pasco
- Distrito: Simón Bolívar

- Centro poblado menor: Paragsha
- Coordenadas UTM: Punto Centro de la Planta.

E 356 990

N 8.816 541

El acceso desde la Ciudad de Lima es mediante la Carretera Central hasta la ciudad de Cerro de Pasco; y desde esta ciudad mediante una carretera afirmada hasta la Planta de Beneficio.

- Vía asfaltada Lima- Cerro de Pasco = 310 m.
- Vía afirmada Cerro de Pasco - Planta = 4 Km

2.3. BASES TEÓRICAS

Para plantear el marco teórico debemos de manifestar que las ecuaciones matemáticas aplicadas en el diseño del molino de bolas son netamente teórico y es necesario tener conocimiento del tipo de mineral que ha de aplicarse.

2.3.1. MOLINO DE BOLAS

La liberación de especies minerales, etapa previa a la concentración, es sin lugar a dudas el proceso unitario de mayor relevancia práctica en todo circuito de beneficiamiento,

por cuanto demanda la principal inversión de capital, incide fuertemente en los costos unitarios y determina en gran medida la rentabilidad de la operación.

La molienda es la última etapa del proceso de conminación, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión ya sea en seco o como una suspensión en agua pulpa.

La molienda se realiza en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como "medios de molienda", los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas de mena.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño a 10 - 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Por supuesto, una submolienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación económica obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración. Sobré molienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario (generalmente la ganga) y puede reducir el tamaño de partícula del componente minoritario (generalmente el mineral valioso) bajo el tamaño requerido para la separación más eficiente. Además se pierde mucha energía, que es cara, en el proceso. Es importante destacar que la molienda es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral.

Figura N° 2.1: vista panorámica de un molino de bolas



Fuente: Elaboración propia

Partes Principales de un Molino

Las piezas fundamentales de un molino son: Casco, Chaquetas o revestimiento, Rejillas, Cuerpos trituradores, Dispositivos de carga y descarga y el accionamiento o mando del molino

Trunión de alimentación

(o muñón de entrada), es el conducto para la entrada de carga impulsada por la cuchara de alimentación

Chumaceras

Se comporta como soporte del molino y la vez la base sobre la que gira el molino

Piñón y catalina

Son los engranajes que sirven como mecanismo de transmisión de movimiento. El motor del molino acciona un contra-eje al que está adosado el piñón, este es encargado de accionar la catalina la que proporciona movimiento al molino, dicha catalina es de acero fundido con dientes fresados.

Cuerpo o casco del molino o shell

El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada, es la parte más grande de un molino y está construido de placas de acero forjadas y soldadas.

Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros. Para conectar las cabezas de los muñones tiene grandes flanges de acero generalmente soldados a los extremos de las placas del casco. En el casco se abren aperturas con tapas llamadas manholes para poder realizar la carga y descarga de las bolas, inspección de las chaquetas y para el reemplazo de las chaquetas y de las rejillas de los molinos. El casco de los molinos está instalado sobre dos chumaceras o dos cojinetes macizos esféricos

Tapas

Soportan los cascos y están unidos al trunnión

Forros o Chaquetas

Sirven de protección del casco del molino, resiste al impacto de las bolas así como de la misma carga, los pernos que los sostienen son de acero de alta resistencia a la tracción forjados para formarle una cabeza cuadrada o hexagonal, rectangular u oval y encajan convenientemente en las cavidades de las placas de forro.

Trunnión de descarga

Es el conducto de descarga del mineral en pulpa, por esta parte se alimenta las bolas, sobre la marcha.

Cucharón de alimentación

O scoop feeders que normalmente forma parte del muñón de entrada del molino

Trommel

Desempeña un trabajo de retención de bolas especialmente de aquellos que por excesivo trabajo han sufrido demasiado desgaste. De igual modo sucede con el mineral o rocas muy duras que no pueden ser molidos completamente, por tener una granulometría considerable quedan retenidas en el

trommel. De esta forma se impiden que tanto bolas como partículas minerales muy gruesas ingresen al clasificador o bombas.

Ventana de inspección

Está instalada en el cuerpo del molino, tiene una dimensión suficiente como para permitir el ingreso de una persona, por ella ingresa el personal a efectuar cualquier reparación en el interior del molino. Sirve para cargar bolas nuevas (carga completa) así como para descargarlas para inspeccionar las condiciones en las que se encuentra las bolas y blindajes.

- las chumaceras del contra eje
- el contra eje
- las poleas
- reductor de velocidad
- el acoplamiento
- el motor eléctrico

Rejillas de los molinos

En los molinos se instalan unas rejillas destinadas a retenerlos cuerpos trituradores y los trozos de mineral grueso, durante el traslado del mineral molido a los dispositivos de descarga.

Para dejar el mineral molido, el muñón el trunnion de descarga, está separado del espacio de trabajo por parillas dispuestas radialmente con aberturas que se ensanchan hacia la salida. El mineral molido pasa por las parillas, es recogido por las nervaduras, dispuestas radialmente y se vierte fuera del molino por el muñón trunnion de descarga. Las parillas y las nervaduras se reemplazan fácilmente cuando se desgastan.

Cuerpos trituradores

Los cuerpos trituradores van a ser utilizados en los molinos cuya acción de rotación transmite a la carga de cuerpos moledores fuerzas de tal naturaleza que estos se desgastan por abrasión, impacto y en ciertas aplicaciones metalurgistas por corrosión. Mientras sea el cuerpo moledor, más resistente a la abrasión va a ser para los trabajadores de abrasión tenemos una gran dureza, pero dentro de un molino tenemos moliendo por impacto, se desea que el producto sea lo más tenaz posible.

Figura N° 2.2: Vista de medios molturantes (bolas de acero)



Fuente: elaboración propia

Dispositivos de descarga

El sistema de descarga del mineral en los molinos es por el muñón de descarga o trunnion de salida que es hueco y generalmente con nervaduras de espiral en el interior del trunnion de salida.

El mineral, al salir del muñón de salida que es hueco, cae a través del tamiz. Las partículas grandes de los cuerpos extraños, los trozos de bolas gastadas y otros materiales por el tamiz. En el sistema de descarga con rejilla, el mineral atraviesa la parrilla del molino y entra en el espacio comprendido entre esta pared cabecera del casco.

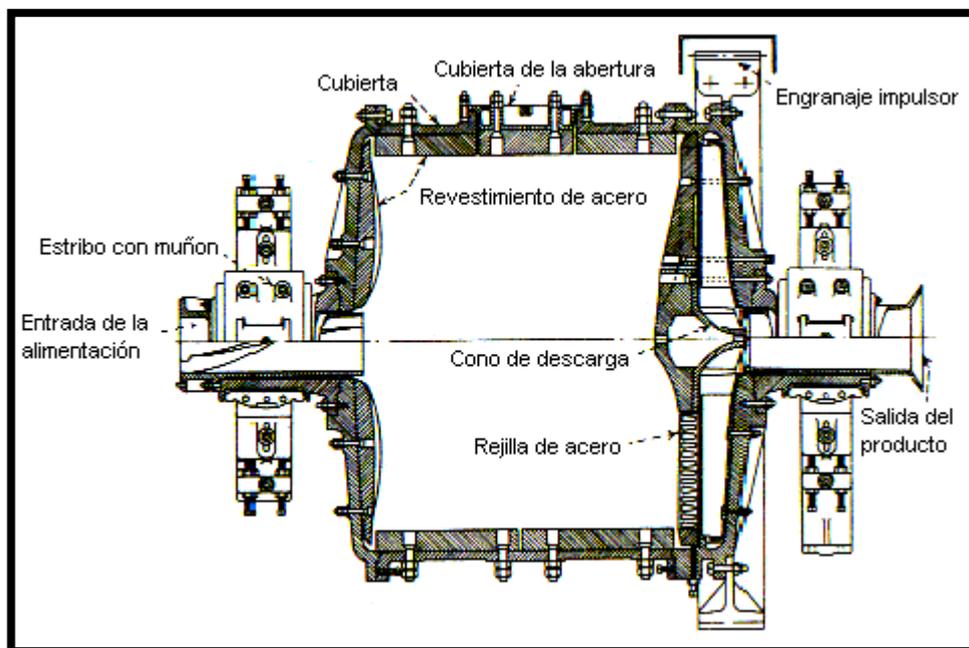
Luego de aquí el mineral es retirado por unos canales sobre el tamiz selector. Las partículas finamente molidas atraviesan el

tamiz y entra en la tolva de finos, los cuerpos extraños caen desde el tamiz y abandona el molino.

Sistema de lubricación

La finalidad de la lubricación es evitar el contacto de metal a metal, traería como consecuencia la formación de limaduras y

Figura N° 2.3. Molino de bolas continuo, tipo rejilla, marca Marcy



Fuente: Pierre Blazy

finalmente la ruptura o en todo caso llegase a fundir valiosas piezas del molino como son las chumaceras causando graves pérdidas en la producción y esta es una de las razones por la cual se lubrica constantemente el piñón y la catalina que son los engranajes dentados de la transmisión del molino.

Para que esta lubricación sea lo más exactamente posible debe ser instalado un sistema automático que en caso de averiarse este provisto de un sistema de alarma eléctrico que nos indicara las condiciones

1.

- falta de presión de aire
- falta de grasa en el cilindro
- falta de presión en la tubería de grasa

2. Por el mecanismo del sistema de engranaje

- mecanismo de bomba
- control de reloj
- bomba neumática

Funcionamiento del sistema de lubricación y engrase del molino.

Todo el sistema funciona con aire a la presión de 100 Lbs por pulgada cuadrada que viene de las compresoras, llega a un filtro de aire donde se elimina las impurezas, el aire a presión y limpio pasa a una válvula de solenoide o de tres vías o líneas.

La primera línea está conectada al switch de presión y al mecanismo de alarma, cualquier variación de la presión o falta de ella será registrada y sonara automáticamente la alarma.

La segunda línea está a los inyectores y finalmente la tercera línea suministrara aire a la bomba de contrapeso y el tamaño de grasa. Por su parte, el tiempo de lubricación, es regulado, es graduado a voluntad en el sistema automático de reloj.

Al cerrar el circuito de control automático de reloj, la válvula de solenoide dejara pasar, aire, parte de cual ejercer presión en el tanque de grasa y la otra parte actuara sobre los balancines de la bomba haciendo salir la grasa conveniente diluida a una presión que llega cerca de las 2000 Lb/pulg²

El lubricante una vez llegada a los inyectores será atomizado, por el aire a presión, en esta lubricara a los engranajes dentados del piñón y la catalina

Lubricación de los trunnions o muñones del molino

Todo esto es un sistema cerrado y la lubricación es permanente. La circulación de aceite es el sistema efectuado por la bomba, la presión constante asegura una lubricación normal del molino. Cualquier caída de presión actuara sobre el

circuito eléctrico del molino parándolo de inmediato. De igual manera una temperatura superior a los 46 °C hará sonar la alarma indicando con esto la necesidad de para el molino. Por lo cual se deberá pararse de inmediato o de lo contrario puede fundirse las chumaceras principales del molino

Sistema de calentamiento o enfriamiento

En los molinos no existe un sistema de calentamiento pero si se puede existir de enfriamiento, este puede estar ubicado en las chumaceras que se calientan constantemente debido a la rotación que realizara el molino y al peso que soporta.

Pero este sistema de enfriamiento lo realizara el sistema de lubricación cuando constantemente va lubricado.

Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares son:

- Amperímetro,
- Decímetro,
- Rotámetro que es un verificador del flujo de agua
- Equipo de control de revoluciones del molino

Descripción tecnológica y funcionamiento de un molino de bolas cilíndrico de una cámara

Es un molino de acción periódica que está formado de un casco o shell soldado eléctricamente, con anillos de acero fundido calzados en caliente o soldados de entrada y salida sostenidos por cojines o chumaceras.

Para proteger al molino de un rápido desgaste, la carga interna del casco se reviste interiormente de placas o chaquetas de acero al manganeso o de otro mineral como Ni-Hard, cromo-molibdeno o de caucho, de acuerdo a las clases de mineral que se muele

Este molino funciona girando sobre sus muñones de apoyo a una velocidad determinada para cada tamaño de molino.

En calidad de agente de molienda se usa bolas de acero de diferentes diámetros, de distinta dureza y composición siderúrgica. Cuando el molino gira, las bolas junto con el mineral es elevado por las ondulaciones de una chaqueta y suben hasta una altura determinada, de donde caen girando sobre si y golpeándose entre ellas y contra las chaquetas o revestimiento interiores. Luego vuelven a subir y caer y así sucesivamente. En cada vuelta del molino hay una serie golpes

producidos por las bolas, estos golpes son los que van moliendo el mineral.

Normalmente los molinos de bolas trabajan 70% a 78% de sólidos, dependiendo del peso específico del mineral.

La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino depende en gran cantidad disponible de energía para mover el molino está en un rango de 40% a 50% generalmente nunca se llega a 50% del volumen.

La carga de bolas debe ser correcta y bien proporcionada, con bolas lo suficientemente grandes para triturar las partículas de mineral más grande y duras, pero no las muy finas.

Los molinos de bolas dan un producto más fino que los molinos de barras porque, la acción de molienda es frenada por las partículas de mineral más gruesas que se interpolen entre barra y barra. Estos molinos trabajan y operan en circuito cerrado con algún tipo de clasificador de rastrillo, espiral o hidrociclón.

Estos molinos de bolas pueden ser accionados por una transmisión de correas trapezoidales y engranajes de mando o una reducción.

En el sistema de molienda en seco, el mineral ya molido hasta la finura indicada, circula hasta que termine que molerse las pocas partículas de mineral grandes no fraccionadas, lo cual aumenta el consumo de fuerza motriz por unidad de producción y disminuye el rendimiento del molino. Al operar el molino por vía húmeda, el mineral finamente molido es extraído con agua de los intersticios entre las bolas y por tanto no perjudica la molienda de las partículas de mineral gruesas.

La capacidad de producción de los molinos de bolas se determina por el peso de carga y la duración del ciclo de operación y trabajo que es la suma de tiempo de carga, de molienda y de descarga.

La duración de molienda es función de las dimensiones del molino, del tamaño de las partículas de mineral entrante y de finura de molido exigida en la concentradora.

La potencia necesaria para el accionamiento del molino es proporcional a su carga y es de aproximadamente de 1,5 kw-hr/Tm de mineral y de la carga de las bolas de acero.

En la operación por vía húmeda se agrega un 50 % a 60 % de agua en peso, para asegurar una descarga rápida del mineral.

La cantidad de mineral que se puede cargar en un molino de bolas oscila de 0,4 a 0,5 toneladas por metro cúbico de capacidad.

El molino de bolas normalmente emplea bolas grandes con un mineral alimentado grueso para rendir un producto relativamente grosero

En algunos molinos se colocan aros ajustados por la unión de la tolva de alimentación por la cual ingresa el mineral al molino, sobre el casco cilíndrico se monta una rueda dentada de acero fundido con dientes fresados, para el accionamiento del molino

En caso de instalarse el molino sobre rodillos, se calzan sobre el casco cilíndrico, coronas de acero para su movimiento.

Los molinos de bolas con mando central, no tienen engranajes dentados

Ubicación del equipo

La sección molienda está ubicada después de un molino de barras o molienda semi-autógena por el molino de bolas es el encargado de pulverizar el material ya triturado en las anteriores etapas, luego de molienda se manda a un ciclón, materiales gruesos regresan a molienda y materiales finos pasan a acondicionadores para luego entrar al proceso de flotación (caso Cu, etc.).

Instalación molienda vía seca

Los molinos de bolas pueden utilizarse desde operaciones en seco o desde operaciones en húmedo.

Se pueden clasificar en función de la marcha:

- Molinos de bolas de marcha discontinua.
- Molinos de bolas de marcha continua.

Para el tratamiento de grandes cantidades de materia se utilizan molinos de marcha continua.

Figura N° 2.4. Vista de un molino de bola alimentación



Fuente: Elaboración propia

Estos molinos se cargan a través de un extremo y el sistema de descarga es por corrientes de aire a través del eje de salida.

Se proyecta toda la instalación completa, donde están incluidos todos los elementos necesarios como clasificadores, ciclón, filtro, ventiladores, conducciones y tolvas.

Variables operacionales de un molino de bolas

Para que la molienda sea racional y económica hay que considerar 3 factores fundamentales que influyen en los resultados y son:

- la carga del mineral
- alimentación de agua
- medios de molienda

La carga de mineral de alimentación al molino:

Cuanto más rápido sea la alimentación al molino más rápido será la descarga que llega al otro extremo y el producto final será más grueso, permanecerá menos tiempo sometido a molienda.

La alimentación de carga del mineral debe ser constante y uniforme, la cantidad se regula en faja de alimentación. De tamaño de mineral apropiado, depende de la trituración 5% malla + $\frac{3}{4}$. Limpias de planchas de Fe, madera, trapos o piezas de acero que pueden cortar la faja de alimentación o bloquear los alimentadores, o producir atoros en la descarga, etc.

Normalmente los molinos trabajan con 70% a 78% de sólidos, dependiendo del peso específico del mineral, la cantidad de mineral que se puede cargar en un molino de bolas oscila de 0.45 toneladas por m³ de capacidad.

Alimentación de agua

Al operar el molino por vía húmeda, el mineral finalmente molido es extraído con agua de los intersticios entre las bolas y por lo tanto no perjudica la molienda de las partículas de

mineral gruesas, por ende en la operaciones se agrega un 50% a 60% de agua en peso, para asegurar una descarga rápida del mineral. El exceso de agua dentro del molino lavara las bolas y cuando se hace funcionar el molino pues el mineral no está pegado en las bolas, haciendo una pulpa demasiado fluida que saca la carga de mineral demasiado rápida, no dando tiempo a moler y disminuyendo el tiempo de molienda, dando como resultado una molienda excesivamente gruesa. Consumo exagerado de bolas y desgaste de chaquetas, todas estas condiciones unidas representan un aumento del costo de producción y una baja eficiencia de la molienda.

En el circuito las cargas circulares elevadas tienden a aumentar la producción y disminuir la cantidad de mineral fino no deseado.

Carga de bolas

La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino depende en gran parte de la cantidad de energía disponible para mover el molino.

Generalmente nunca llega al 50 % de volumen, aunque una carga de bolas igual a 50 % del volumen del molino da la capacidad máxima, el volumen total de las bolas no debe ser

menor que el 20 % del volumen interior (las cargas normales varían de 40 a 50 %).

Donde quiera que se desee una producción mínima de finos debe usar una carga de bolas cuyo diámetro está relacionado al tamaño del mineral que se alimenta, el aumento de la carga de bolas, hace elevar el gasto de energía hasta alcanzar un valor máximo, por encima del cual la energía necesaria disminuye al aumentar la carga, por acercarse al centro de gravedad de esta al eje de rotación.

La carga se puede aumentar elevando el peso de bolas cargado al molino aumentando la densidad de sólidos de la pulpa a moler, o trabajando a nivel de líquidos más alto.

Este nivel de pulpa, que es función de la cantidad de molienda, constituye un factor muy importante en el funcionamiento del molino de bolas.

Normalmente la carga de bolas se debe determinar mediante ensayos metalúrgicos por estudios detenidos. La potencia necesaria es máxima cuando el contenido en sólidos de alimentación es del orden del 75 %.

El consumo de bolas esta dado en función al tonelaje tratado, a la dureza del mineral, al tamaño de la carga de mineral. Cuanto más pequeñas sean las bolas mayor será la finura del producto final, la calidad de las bolas se fabrican de acero moldeado, fundido, laminado o forjado, normalmente se emplea acero al manganeso a al cromo.

En resumen la elección de las dimensiones de un molino es función de muchos factores entre los cuales: la dureza del mineral, el tamaño promedio de la alimentación, como también el grado de finura a obtenerse, humedad de la pulpa, la cual forma de las superficies de los de los forros ya sean onduladas o lisas y se emplean para molienda gruesas y finas respectivamente, la velocidad el molino afecta a la capacidad y también al desgaste , en proporción directa hasta el 85% de la velocidad critica.

Las variables de molienda se controla por:

- Sonido de las bolas
- Densidad del motor
- Amperímetro del motor

El sonido de las bolas nos indica la cantidad de carga dentro del molino. El sonido deberá ser claro. Si las bolas producen

un ruido muy sordo u opaco, es porque el molino está sobrecargando por exceso de carga o falta de agua.

Si el ruido de las bolas es excesivo, es porque el molino esta descargado o vacío, por falta de carga o mucho agua.

El grado de densidad de densidad en la salida del molino debe ser tal que la pulpa sea espesa y avance por su muñón de descarga con facilidad, sin atorarse, la pulpa no debe ser de densidad muy baja.

El amperímetro es un aparato eléctrico que esta intercalado en el circuito del motor eléctrico del molino

Su función es de determinar y medir el consumo de amperios de la intensidad de la corriente que hace el motor eléctrico. Generalmente el amperímetro del motor eléctrico del molino debe marcar entre ciertos límites normales en cada planta concentradora.

Factores que Afectan la Eficiencia de molienda

Varios factores afectan la eficiencia del molino de bolas. La densidad de la pulpa de alimentación debería ser lo más alta posible, pero garantizado un flujo fácil a través del molino. Es

esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena; una pulpa demasiado diluida aumenta el contacto metal-metal, aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65 a 80% de sólidos en peso, dependiendo de la mena. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor.

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posible y la carga debería ser distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y más dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá de un amplio rango de tamaños de bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros.

El exceso de agua en el molino ocasiona

Un exceso lavara las bolas y cuando se hace funcionar el molino no se obtiene una buena acción de molienda pues el mineral no está pegado a las bolas, haciendo una pulpa demasiado fluida que saca la carga de mineral demasiado rápida, no dando tiempo a moler disminuyendo el tiempo de molienda, dando como resultado una molienda excesivamente gruesa, consumo exagerado de bolas aumento de costo de producción y una baja eficiencia de molienda.

El exceso de agua en la molienda da como resultado

- Molienda gruesa
- aumento de costo de producción
- densidad baja
- menor eficiencia del molino
- bajo tonelaje del molino
- excesivo consumo de bolas y chaquetas o revestimiento
- paradas obligadas del molino por pernos flojos, rupturas de pernos, caída de chaquetas o revestimiento interiores del molino.
- Costo de molienda altos

Falta de agua en el molino

La pulpa del mineral avanza lentamente y se hace cada vez más densa, las bolas no muelen, porque el barro se muele muy espeso alrededor de las bolas, impidiendo buenos golpes por que el barro amortigua todos los golpes.

En estas condiciones de operación las bolas pueden salir junto con la pulpa de mineral.

La falta de agua en un molino ocasiona:

- molienda gruesa y mala
- paradas obligatorias del molino
- densidad elevada
- molienda deficiente por que el barro se pega a las bolas amortiguando los golpes
- perdidas de tonelaje en el molino

La frecuencia de carga de las agentes de molienda, bolas, dependen de estas variables:

- tiempo de operación de la molienda
- tonelaje de mineral de trabajo
- tamaño de la carga en la entrada del molino
- malla deseada por la planta
- dureza del mineral de alimentación

La sobre carga del molino puede ser debida por las causas siguientes:

- falta de agua en un molino
- mala regulación del tonelaje
- sobrecargas
- exceso de carga en el molino

La densidad muy baja en la descarga del molino puede ser debido a:

- falta de agua en molino
- tonelaje elevado en el molino
- mala regulación de agua en molino

Las pérdidas de tonelaje en el molino son ocasionadas:

- paradas innecesarias del molino
- mal funcionamiento de las fajas de alimentación
- fajas de alimentación descentradas
- polines trabados en fajas de alimentación
- swtchs electrónicos flojos en las fajas de alimentación
- deficiente alimentación debido a continuos atoros en los chutes

Montaje de los molinos:

- El eje del motor deberá estar bien nivelado

- El acoplamiento del eje del motor eléctrico con el eje del piñón dentado deberá estar bien alineado
- La rueda o catalina dentada deberá estar bien centrada y concéntrica
- Los dientes de los engranajes de la transmisión del movimiento del molino deberán tener una tolerancia correcta de contacto
- Los pernos, tuercas, chavetas y todo material que sujeta los engranajes dentados, deberá estar revisados

Circuitos de Molienda y Clasificación

Los circuitos de molienda se utilizan para reducir el tamaño de las partículas de mena al tamaño requerido para su beneficio.

La mayoría de las menas sulfuradas se muelen en circuitos húmedos usando una o más etapas de molienda para obtener la liberación de los minerales necesarios para producir un concentrado final que cumpla con los criterios deseados. Las ventajas de molienda húmeda son:

- Menor consumo de energía por tonelada de producto.
- Mayor capacidad por unidad de volumen.
- Posibilita el uso de harneado en húmedo o clasificación mecánica (centrifuga) para controlar bien el tamaño del producto.
- Elimina el problema de polvo (criterio ambiental).

- Hace posible el uso de métodos simples de manejo y transporte de pulpas tales como bombas, cañerías y canaletas.

Los hidrociclones son el equipo de clasificación usado en circuitos modernos de molienda húmeda.

2.3.2. OPERACIÓN.

Se dice que los medios de molienda efectúan movimientos de cascada y catarata. El primero de ellos se aplica al rodado de bolas o piedras de la parte superior hacia la base del montón, y el segundo al lanzamiento de bolas por el aire hasta la punta del montón. La acción de las bolas se ha estudiado y analizado desde este punto de vista

Estos desarrollos matemáticos rigurosos se basan en hipótesis especulativas sobre la forma de la masa de bola.

Los factores principales que determinan el tamaño de las bolas de molienda son la finura del material que se está pulverizando y el costo de mantenimiento para la carga de las bolas. Cualquier material grueso alimentado requiere una bola mayor que una alimentación fina; se ha propuesto la relación:

$$D_p \frac{2}{b} = KX_p \quad (1)$$

Donde:

D_p = Es el diámetro de bola.

X_p = Es el tamaño de las partículas de alimentación más gruesas dándose ambas dimensiones en cm (inche); y

K = es la constante de molibilidad que varía de 140 cm (55 inche) en el caso de la lidita a 90 cm (35 in) para la dolomita.

La necesidad de una distribución de alimentación calculada según el tamaño de la bola es una cuestión que no se ha aclarado aún por completo; sin embargo, se ha propuesto métodos para calcular una carga de bolas racionada.

El tamaño óptimo recomendado para el vástago y las bolas es:

$$D_b = \sqrt{\frac{X_p E_t}{K n_r}} \sqrt{\frac{\rho_x}{\sqrt{D}}} \quad (2)$$

Donde:

D_b = Diámetro del vástago o de la bola, cm (in);

D = Diámetro del molino,

E_t = Es el índice de trabajo del material alimentado;

n_r = Es la velocidad, por ciento de la velocidad crítica;

ρ_s = Es la gravedad específica del material alimentado;

$K = 214$ para vástagos y 143 para bolas. La constante K tiene un valor de 300 para los vástagos y 200 para las bolas, cuando D_b y D se expresan en pulgadas y pies, respectivamente.

Esta fórmula da resultados razonables para molinos con tamaño de producción, pero no así con los de laboratorio. La razón entre los tamaños recomendados de bola y varilla es 1:23, debido al desgaste. Por ejemplo, el diámetro del vástago puede variar de 10 a 2,5 cm (4 a 1 inche). Por lo común, se acostumbra conformar una nueva carga de vástagos en función de la usada, y esto ha dado buenos resultados.

El criterio que se sigue para comparar la acción de las bolas en molinos de varios tamaños se basa en el concepto de la velocidad crítica. Se trata de la velocidad teórica a la que la fuerza centrífuga ejercida sobre una bola en contacto con la cubierta del molino, a la altura de su trayectoria, es igual a la fuerza ejercida sobre ella debido a la gravedad:

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad \text{Sistema métrico}$$

$$N_c = \frac{76,6}{\sqrt{D}} \quad \text{Sistema ingles} \quad (3)$$

Donde:

N_c = Es la velocidad crítica en rpm, y

D = Es el diámetro del molino m (ft), para un diámetro de bola que resulta pequeño con respecto al diámetro del molino. El numerador de la expresión anterior es 76,6 cuando D se expresa en pies.

Las velocidades reales de los molinos varían de 65 a 80 % de su valor crítico. Podría generalizarse que se necesita del 65 al 70 % para la molienda fina en húmedo en suspensión viscosa, 70 a 75 % para moliendas finas en húmedo, en suspensiones de baja viscosidad y para moliendas en seco de partículas grandes con tamaños del orden de 1,3 cm (1/2 inche). Las velocidades pueden incrementarse en un 5 % del valor crítico cuando se trata de molinos sin desviadores, para compensar alguna falla.

Circuitos de molinos de volteo. Los molinos de volteo o tambor pueden funcionar en un circuito cerrado normal, o bien, en un arreglo inverso, en donde la alimentación pasa por el clasificador antes de entrar al molino. Estos arreglos se utilizan también con molinos de compartimientos, en donde el material se clasifica por aire entre las etapas de molienda, en los compartimientos del mismo molino.

Cargas de material y bolas. La carga del medio de molienda, se expresa en función del porcentaje del volumen del molino ocupado por el medio de molienda; por ejemplo, un volumen masivo de bolas que ocupan la mitad del molino es aproximadamente una carga de bolas del 50 %. El espacio vacío de un volumen masivo estático de bolas es aproximadamente el 41 %. Puesto que el medio se expande conforme gira el molino, el volumen real de funcionamiento se desconoce.

Hay relaciones sencillas que gobiernan la cantidad de bolas y espacios vacíos en un molino. El peso de las bolas es igual a $\rho_b \epsilon_b V_m$, en donde: ρ_b = densidad promedio de las bolas, g/cm^3 (lb/ft^3); ϵ_b = fracción de llenado aparente de las bolas y V_m = volumen del molino. Las bolas de acero tienen una densidad aproximada a $4,8 \text{ g/cm}^3$ (300 lb/ft^3); las piedras representan $1,68 \text{ g/cm}^3$ (100 lb/ft^3) y las bolas de alúmina, $2,4 \text{ g/cm}^3$ (150 lb/ft^3).

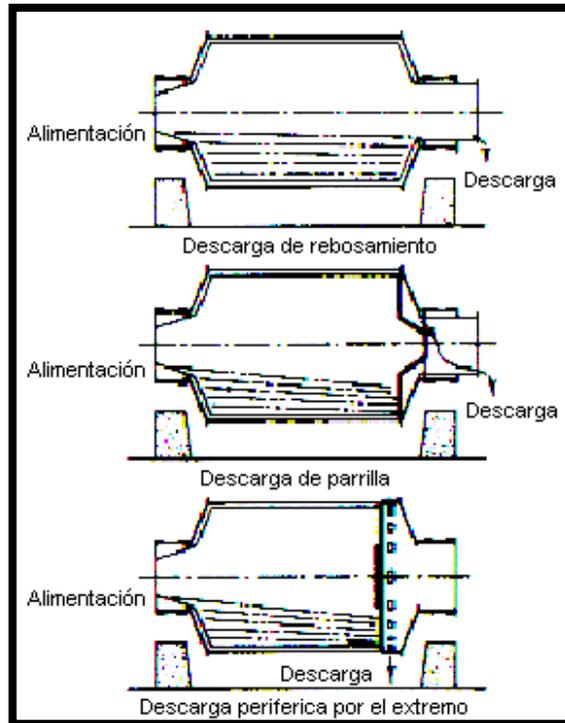
La cantidad de material que se tiene en un molino se expresa convenientemente como la relación entre su volumen y el de los espacios vacíos dentro de la carga de bolas. Esta expresión se conoce como razón del material a espacio vacío. Si el material sólido y el medio de suspensión (agua, aire,

entre otros.) llenan exactamente los huecos de bola, la razón M/V es 1. Las cargas de los medios de molienda varían de 20 a 50 % en la práctica y en general, las razones M/V se aproximan a 1.

La concentración de sólidos en la lechada de un molino de piedras debe ser lo suficientemente grande para dar una viscosidad de lechada de por lo menos $0,2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (200 centipoises) para asegurar su mejor eficiencia; pero es probable que esto requiera ajustar la carga a las paredes del molino liso utilizado. La carga de material en molinos continuos no se puede ajustar de manera directa, sino que se determina indirectamente según las condiciones de operación. Existe una razón de carga tratada máxima que depende de la forma del molino, las características de flujo de la alimentación, la velocidad del molino, el tipo de material alimentado y la disposición de descarga.

Alimentación y descarga. Los esquemas de alimentación y descarga de los molinos de bolas y varillas dependen de su modo de operación. En la figura N° 2,5, se muestran varios mecanismos de alimentación y descarga.

Figura N° 2.5. Sistemas de descarga de un molino de bolas continuo para moliendas por vía húmeda.



Fuente: Pierre Blazy

Los dosificadores alimentadores de molino unidos al muñón de alimentación del molino cónico y utilizado para pasar la alimentación al molino sin derramamiento, son de varios tipos. Por lo general, se utiliza un canal de alimentación para la molienda en seco que consiste en un canal inclinado, unido a la orilla extrema del muñón por donde pasa el material antes de llegar al molino. Un dosificador de tornillo sinfín, que tiene una sección corta de transportador de tornillo que se extiende parcialmente dentro de la abertura de la alimentación y transporta el material dentro del molino, puede ser utilizado también cuando se trate de molienda en seco. Para moliendas en húmedo, existen varios dosificadores

distintos; el dosificador de pala que va unido y gira con el muñón del molino que se introduce en una caja estacionaria para recoger el material y transportarlo hasta el molino; un dosificador de tambor sujeto al muñón de alimentación y que gira con éste, con una abertura central por la que se introduce el material y un deflector interno o elevador para hacer pasar el material por el muñón al interior del molino; o una combinación de tambor y dosificador de pala, en donde la nueva carga de material que llega al molino se introduce a través de la abertura central del tambor al mismo tiempo que la pala recoge el material de tamaño grande que se devuelve de un clasificador a la caja de pala que queda abajo de la línea central del molino. El dosificador del molino debe ser capaz de manejar cualquier cantidad de material que el molino pueda tratar y, además, una carga circulante que llega a ser del orden de 1000% del nuevo índice de alimentación.

Los molinos de descarga por rejilla o parrilla permiten controlar el nivel de pulpa para obtener una gran carga circulante. En un caso específico se obtuvo un aumento del 18 % en la capacidad debido a la conversión de un molino de rebosamiento a un molino de descarga por rejilla, a pesar de que se registró una pérdida del 10 % del volumen de molino debido al cambio. La principal razón fue eliminar los finos del

molino debido a la razón de recirculación incrementada. Las rejillas o parrillas dejaron pasar la cantidad suficiente de pulpa para mantener la carga circulante en un nivel equivalente a 400 %.

2.3.3. EFICIENCIAS DEL MOLINO.

Los factores de control que se sabe regulan la eficiencia de molienda de minerales, en molinos cilíndricos son como sigue:

1. La velocidad del molino afecta la capacidad, al igual que el desgaste del recubrimiento y de las bolas, en una proporción directa hasta del 85% de la velocidad crítica.
2. La carga de bolas equivalente al 50% del volumen del molino, da la capacidad máxima.
3. Las bolas de tamaño mínimo capaces de moler el material alimentado, dan una eficiencia máxima.
4. Los recubrimientos ranurados de tipo ondulado son los preferidos entre los usuarios.
5. La eficiencia del clasificador se hace más importante en moliendas de varias etapas.
6. Las cargas circulantes de mayor tamaño tienden a aumentar la producción y reducir la cantidad de material fino no deseable.

7. La descarga de nivel bajo o rejilla incrementa la capacidad de molienda en comparación con la descarga central o por rebosamiento, aunque el desgaste del revestimiento, la rejilla y los medios es mayor.
8. Las razones de sólidos a líquidos en el molino deben estudiarse basándose en la densidad del mineral y la relación volumétrica.

2.3.4. PARÁMETROS DEL MOLINO

Las pruebas experimentales representadas en un artículo de Coghill y De Vaney, han hecho que los autores lleguen a las siguientes conclusiones:

1. En la molienda de bolas por lotes y por vía húmeda, con cargas de minerales de 90 a 160 kg (200 a 350 lb), se necesitaron aproximadamente 35 kg (75 lb) de mineral para llenar los intersticios de las bolas en reposo y con velocidades del 30 al 80 % de la crítica, la velocidad baja dio el mismo tipo de molienda que la alta. Las cargas grandes de minerales dieron una molienda un poco más selectiva de partículas gruesas que las cargas más ligeras. Se obtuvieron mejores capacidades con cargas ligeras y eficiencias un poco mayores con cargas grandes de minerales.

2. Algunas de las características de molienda en seco en molinos de bolas por lotes fueron diferentes a las que se obtuvieron en moliendas en húmedo. En el trabajo en seco, la eficiencia y la capacidad mejoraron con cargas ligeras de minerales. Se redujeron los requisitos de potencia al disminuir la cantidad de mineral dentro del molino y en la molienda en húmedo aumentó al disminuir dicha cantidad. En moliendas en seco, la velocidad elevada fue más eficiente que la velocidad baja.
3. Al comparar la molienda en húmedo y en seco, las pruebas por pares se realizaron, de tal manera que todas las variables establecidas fueron idénticas, excepto la consistencia de la pulpa (húmeda o seca). Con un peso intermedio de carga de mineral, la molienda selectiva resultó del mismo grado; con cargas grandes de minerales, la molienda en húmedo fue más selectiva, y con cargas ligeras, la molienda en seco resultó más selectiva.
4. Al comparar la molienda húmeda y seca en molinos de bolas y circuito abierto, la que se hizo en húmedo dio un 39 % más de capacidad y un 26 % más de eficiencia.
5. El volumen reducido de bolas no fue satisfactorio en el tipo de molinos de rebosamiento o inundación en seco, porque se desarrollaba un exceso de mineral dentro del molino.

Cuando se logró prevenir el desarrollo excesivo de mineral simulando un molino de nivel bajo de pulpa, el volumen de bolas pequeño dio buenos resultados.

6. Con un 60 % de sólidos, las rocas del mismo tamaño que las bolas efectuaron la misma clase de trabajo que estas últimas cuando se molió dolomita; pero no se logró una molienda efectiva en el caso de la lidita. Las piedras dieron aproximadamente el 35 % de la capacidad y el 81 % de la eficiencia que caracterizó a las bolas.
7. Para minerales duros y de dureza intermedia, los tetraedros no dieron buenos resultados como medio para la molienda gruesa.
8. Las bolas muy duras (níquel duro) resultaron mejores que las bolas ordinarias, sobre todo cuando se trataba de minerales de extremada dureza.
9. La eficiencia de las bolas desgastadas y desechadas, fue aproximadamente 11 % menor que la de las bolas esféricas nuevas.
10. Un molino de bolas tan pequeño como de 48 por 91 cm (19 por 36 inche) logró duplicar el trabajo de un molino tamaño planta. Los ensayos llevaron a la conclusión de que, si cada una de las variedades de los molinos, grandes o pequeños, se prueba en las mismas condiciones y si se aplica una unidad de trabajo por

unidad de mineral, el efecto (molienda o trituración) será el mismo, según indican los productos; dicho de otra manera, se mantendrá la misma relación entre causa y efecto.

2.3.5. SELECCIÓN DEL MOLINO.

La selección de la unidad de molienda entre un molino de bolas o de vástago, se basa en los experimentos del molino piloto con escalamiento presuponiendo que la producción es proporcional al consumo de energía. Cuando no se pueden realizar experimentos piloto, el rendimiento se basa en datos publicados para tipos del material similares, expresados en función de la molibilidad o de los requisitos de. Los métodos más recientes para determinar los tamaños de los molinos y especificar las condiciones de operación para un funcionamiento óptimo en circuito, se basan en soluciones de computadora de las ecuaciones de molienda, aplicando valores de las funciones de velocidad y rompimiento determinados a través de ensayos piloto y de escala.

El molino de bolas es adecuado para materiales finos y gruesos, moliendas en húmedo o en seco, en circuito cerrado con clasificadores, cribas o separadores de aire. Se encuentra en diferentes clases de descarga, por ejemplo, de diafragma

(rejas) o rebosamiento. La selección entre la molienda en seco y en vía húmeda la suele indicar el uso final del producto. Cuando el material puede ser molido en vía húmeda o seca, el consumo de energía, desgaste del recubrimiento y los costos de capital determinan el diseño. El consumo de los medios de molienda y el desgaste del recubrimiento por tonelada de producto es más bajo para un sistema de molienda en seco. A pesar de esto, el consumo de energía para un sistema de molienda en seco es aproximadamente 30 % mayor que para la molienda en vía húmeda y requiere el empleo de un colector de polvos.

2.3.6. CAPACIDAD Y CONSUMO DE ENERGÍA.

Un método para determinar el tamaño adecuado del molino se basa en la observación de que el volumen de molienda depende de la cantidad de energía consumida, suponiendo que existe una práctica de operación aceptable comparable en cada caso. La energía aplicada a un molino de bolas se determina primordialmente de acuerdo con el tamaño del mismo y la carga de las bolas. Algunas observaciones teóricas demuestran que la potencia neta requerida para impulsar un molino de bolas es proporcional a $D^{2.5}$, pero este exponente puede ser usado sin ninguna modificación para

comparar dos molinos, sólo cuando las condiciones de operación son idénticas. La potencia neta necesaria para impulsar un molino de bolas resultó ser:

$$E = [(1,64 L - 1) (k + 1)][(1,64 D)^{2,5} E_2] \quad (4)$$

Donde:

L = Es la longitud interna del molino, m (ft);

D = Es el diámetro interno medio del molino, m (ft);

E_2 = Es la potencia neta utilizada en un molino de laboratorio de 0,6 por 0,6 m (2 por 2 ft), en condiciones similares de operación, y K es 0,9 para molinos con longitudes menores de 1,5 m (5 ft) y 0,85 para molinos mayores de 1,5 m. Esta fórmula puede utilizarse para aumentar a escala de experimentos de molienda en unidades piloto en las que varíe el diámetro y la longitud del molino, pero el tamaño de las bolas y la carga de las mismas como fracción del volumen del molino permanecen sin alteraciones. Este procedimiento ha proporcionado resultados dignos de confianza.

2.3.7. MOTOR Y TRANSMISIÓN.

El consumo de energía de los molinos de bolas y varillas es básicamente constante y depende en forma principal del

diámetro y carga de las bolas. En esta circunstancia, el equipo más adecuado es el motor síncrono. Los grandes molinos de bolas son impulsados ahora con motores hasta de 7500 kW (10 000 hp). Estos requisitos tan grandes de energía hacen que la selección de los sistemas de transmisión y engranaje sea extremadamente grande la transmisión de los grandes momentos de torsión desde el piñón a los engranes del molino llega a ser un problema no muy confiable y su costo es prohibitivo. Los grandes molinos son impulsados por un arreglo de piñón múltiple con reguladores de carga.

2.3.8. MOLINO DE BOLAS ALLIS-CHALMERS

Los molinos de Xbolas con descarga de reja Allis-Chalmers proporcionan productos finamente pulverizados, de malla 28 a 325, partiendo de un tamaño de material alimentado de aproximadamente 1,3 cm (1/2 in). Los diámetros varían de 2,7 a 4,9 m (9 a 16 ft), las longitudes de 2,4 a 7,3 m (8 a 24 ft), y la potencia de 110 a 2500 kW (150 a 3300 hp). Se recomienda generalmente para las siguientes aplicaciones: molienda en húmedo y en seco en circuito cerrado con clasificador para prevenir excesos, logrando una molienda más o menos gruesa con tamaño máximo de producto alrededor de la malla 48, aproximadamente. El producto de trituradora más

fino con tamaños máximos dentro del intervalo de 0,6 a 1 cm (1/4 a 3/8 in) constituye un material de alimentación excelente para molinos de diafragma de nivel bajo, que podrán manejar material de alimentación hasta de 2,5 cm (1 in) si están provistos con revestimientos de capa extragruosa y una descarga de diámetro amplio. Para molinos de diafragma de nivel intermedio, el material alimentado de mayor tamaño debe ser del orden de 0,3 a 0,6 cm (1/8 a 1/4 in). Ambos molinos vienen en presentaciones tanto de nivel bajo como de nivel intermedio.

2.3.9. TIPO REBOSAMIENTO

El molino tipo rebosamiento o inundación se recomienda casi siempre para las siguientes aplicaciones: molienda húmeda en circuito cerrado con clasificador para evitar la trituración excesiva, y obtener una molienda fina en donde el tamaño máximo del producto no sea mayor que la malla 65. El producto de un molino de vástago u otro tipo de alimentación en la gama de malla 8 o más constituye una excelente alimentación para molinos de bolas. El material alimentado es casi siempre de malla 8 o menor, los diámetros varían de 2,7 a 4,9 m (9 a 16 ft), las longitudes de 2,4 a 7,3 m (8 a 24 ft) y la potencia de 22 a 1200 kW (300 al 600 hp).

2.3.10. MOLINO KOPPERS Co. Inc.

El molino cónico es similar al cilíndrico en el hecho de que consta de un tambor rotatorio que gira en torno a su eje horizontal y opera de manera muy semejante; pero, contrariamente a lo que sucede con el cilíndrico, tiene extremos cónicos en lugar de rectos.

2.3.11. MOLINO HARDINGE.

Los molinos Hardinge para moliendas por vía húmeda cuentan con combinaciones de descarga como la que se ilustra en la figura N° 5 para niveles de pulpa alto, intermedio o bajo, cuyo uso depende del problema específico que se esté estudiando. Para moliendas en seco se acostumbra utilizar una rejilla vertical con elevadores de descarga de pulpa de bajo nivel.

Tabla N° 2.1. Rendimiento ilustrativo de un molino Marcy de bolas

Tamaño , ft	Carga de lasa bolas, tonelada	hp Por corrida	Velocidad del molino rpm	Capacidad, toneladas/24h (basada en mineral de dureza)									
				Tamiz No. 8	Tamiz No. 20	Tamiz No. 35	Tamiz No. 48	Tamiz No. 65	Tamiz No. 80	Tamiz No.100	Tamiz No.150	Tamiz No.200	
				20 % -200	35 % -200	50 % -200	60 % -200	70 % -200	80 % -200	85 % -200	93 % -200	97 % -200	

3 x 2	0.85	5-7	35	19	15	12	10	8	6 ½	5	4	3
4 x 3	2.73	20- 24	30	80	64	53	45	36	28	22	18	14
5 x 4	5.25	44- 50	27	180	145	120	102	82	63	51	41	32
6 x 4 ½	8.90	85- 95	24	375	300	250	210	170	135	105	85	66
7 x 5	13.10	135-150	22 ½	640	510	425	360	290	225	180	145	113
8 x 5	20.2	220-245	21	1100	885	735	625	500	390	310	250	195
9 x 7	30.0	345-380	20	1800	1450	1200	1020	815	635	505	410	315
10 x 10	56.50	700-750	18	3680	2960	2450	2100	1700	1325	1050	850	655
12 x 12	90.5	1260-1345	16.4	7125	5725	4750	4070	3290	2570	2035	1650	1275

Fuente: Arthur Taggarth

Los molinos Hardinge se encuentran disponibles en tamaños de 0,9 a 4,3 m (3 a 14 ft) de diámetro con longitudes de 1 a 2 veces el tamaño del diámetro. Este tipo de molinos se utilizan para la molienda en vía húmeda de arenisca, cuarcita y granitos y la molienda en vía seca de abrasivos y coque.

2.3.12. MOLINO AEROFALL.

El molino Aerofall (Aerofall Milis Ltd.) Es de tipo autógeno para procesamientos en seco con una forma similar a la del molino en cascada. Tiene barrido de aire y, por ende, no requiere una rejilla de descarga; pero sí necesita un sistema de control de aire y un ciclón. El material proveniente directamente de la excavación de la mina se reduce en circuito cerrado hasta obtener los tamaños de productos finales. Los molinos autógenos eliminan el desgaste de los medios de bolas, aun que con frecuencia se incluye un 5 % de carga de bolas grandes. Sus relaciones pequeñas de longitud a diámetro

hacen que sean apropiados para cargas circulantes muy elevadas en operaciones de circuito cerrado.

2.3.13. MOLINO ROCKCYL.

Los molinos Rockcyl de la Allis-Chalmers se utilizan para moliendas autógenas ya sea en seco o en húmedo.

Los molinos Rockcyl con razones de longitud a diámetro de 1 a 3, aproximadamente, eliminan todas las etapas de trituración excepto la primaria, toda la molienda en molino de vástago y el total o parte de las etapas de la molienda con bolas en un diagrama de flujo convencional.

La molienda intermedia de rocas reduce al tamaño deseado el producto de dimensiones menores a 2 cm (3/4 in) proveniente de operaciones de trituración en circuito cerrado. La roca clasificada por tamaños que sale de la trituradora primaria sirve como el medio. Los molinos Rockcyl que tienen razones de longitud a diámetro de 1 a 2, aproximadamente, se emplean para la molienda intermedia de rocas.

La molienda secundaria de rocas es la reducción al tamaño deseado del producto de un molino de vástago o de un molino

primario de rocas, utilizando medios clasificados por tamaños, ya sea de una etapa de trituración o de un molino primario. Este proceso recibe a menudo el nombre de molienda de roca.

2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Mineral.- Es aquella sustancia sólida, natural, homogénea, de origen inorgánico, de composición química definida.

Metalurgia.- Es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos hasta los no metálicos.

Proceso Metalúrgico.- Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural, separándolo de la ganga.

Operación Planta Concentradora.- Las operaciones de las Plantas Concentradora de minerales requieren en la mayoría de los casos de una preparación previa de los minerales que conllevan a la liberación de las partículas valiosas de su ganga acompañante. Con las diversas etapas de trituración, molienda, flotación, espesamiento y filtrado se conseguirá completar el grado de liberación necesario para el concentrado de Minerales.

Mena.- Minerales de valor económico, los cuales constituyen entre un 5 y 10% del volumen total de la roca. Corresponden a minerales sulfurados y oxidados, que contienen el elemento de interés, por ejemplo cobre, molibdeno, zinc, etc.

Proyecto.- Considera la construcción de una planta concentradora de mil toneladas al mes para minerales sulfurados.

2.5. HIPOTESIS:

2.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

Si realizamos la evaluación de parámetros entonces podemos realizar el diseño de un molino de bolas en la Empresa Administradora Cerro S.A.C.

2.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:

1. Si determinamos los parámetros que se tendrá en cuenta entonces podemos hacer el diseño un molino de bolas.
2. Si identificamos los componentes que deben ser analizados entonces podemos hacer el diseño un molino de bolas.
3. Si determinar el tipo de mineral que debe ser tratado entonces podemos hacer el diseño un molino de bolas.

2.6. VARIABLES:

2.6.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Diseño de un molino de bolas

2.6.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Evaluación de parámetros

2.6.3. VARIABLES INTERVINIENTES

Variable independiente:

- Parámetros (variables)
- Tipo de molino.
- Ecuaciones matemáticas

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El trabajo será no experimental utilizando la metodología analítica y deductiva, que será analizado por ecuaciones matemáticas que son aplicados en el diseño de un molino.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El Diseño empleado en la presenta Investigación es el de carácter causa - efecto; metodología que permite establecer la relación existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido, considerado como variable Dependiente, teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado, y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación como experimental - condicionada.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el Tipo de Investigación pre experimento, porque permite responder a los problemas planteados, describiendo y explicando las causas - efectos, traducidos en resultados obtenidos de las pruebas pre experimentales del diseño del molino de bolas.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

Como población de estudio lo considero a los cálculos matemáticos que son necesarios para el diseño del molino de bolas en la Empresa Administradora Cerro S.A.C.

3.4.2. MUESTRA

Como muestra de estudio es la aplicación de las ecuaciones matemáticas que son necesarios para el diseño del molino de bolas.

3.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MOLINOS

A título ilustrativo, en el siguiente cuadro, se dan las características de los molinos de Barras, Bolas y Rodillos de tamaños grandes.

Tabla N° 3.1: Características de los molinos

TIPO DE MOLINO	DE BARRAS	DE BOLAS	DE RODILLOS
Tamaño en pies (metros)	D: 10 (3,05) L: 14 (4,3)	D: 10 (3,05) L: 16 (4,9)	D: 30 (9,15) Alto: 70 (21,3)
Potencia máx. en HP	800	1000	2000
Capacidad de producción en tn/24 hs.	2700	3000	5000
Descarga	Rebalse Periféricas	Rebalse Diafragma Compartimentado	Neumática
Molienda	Húmeda Húmeda y seca	Húmeda Húmeda y seca	Humedad < 20%

Fuente: Arthur Taggarth

Una diferencia a tener en cuenta entre los molinos de Bolas y los de Barras (dado que sus tamaños son similares, así como sus potencias y capacidades) es la máxima velocidad que pueden alcanzar; en el primero la máxima posible puede llegar a alcanzar hasta un 90 % de la velocidad crítica mientras que en el segundo puede alcanzar hasta un 70 % de la velocidad crítica. Otra diferencia, que se explica más adelante, es el desgaste de los elementos moledores por tonelada tratada.

3.6. ELEMENTOS IMPORTANTES EN LA MOLIENDA

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son:

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

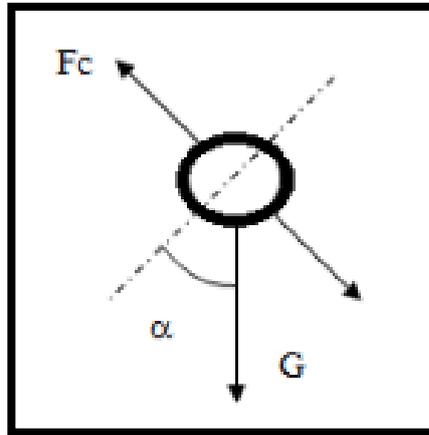
3.6.1. VELOCIDAD CRÍTICA

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y **no ejercen** la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica.

A continuación se expone un ejemplo de cálculo de velocidad crítica con elementos esféricos (bolas).

Utilizando un **sistema de referencia no inercial** se tiene:

Figura N° 3.1: Diagrama para el cálculo de la velocidad crítica



Fuente: Elaboración propia

$$F_{centrífuga} = ma_c = m * \frac{v^2}{R}$$

Donde:

a_c = aceleración centrífuga.

Planteando ahora el equilibrio de fuerzas antes mencionado y siendo $G * \text{sen}\alpha$ la componente centrípeta del peso G se llega a:

$$F_{centrífuga} = ma_c = m * \frac{v^2}{R} = G * \text{sen}\alpha$$

$$\alpha \rightarrow 90^\circ \Rightarrow \text{sen}\alpha \rightarrow 1$$

Reemplazando:

$$m * g = \frac{m \cdot D^2 n^2 \pi^2}{R}$$

$$\Rightarrow g = \frac{m \cdot D^2 n^2 \pi^2}{R} \Rightarrow g = D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \Rightarrow n^2 = \frac{g}{2 D \pi^2}$$

$$n = \sqrt{\frac{9,8}{2\pi^2} \cdot \frac{1}{D}} = n_{(rsp)} = \frac{0,705}{\sqrt{D(m)}}$$

$$n_c (rpm) = \frac{42,3}{\sqrt{D(m)}} = n_c (rpm) = \frac{76,63}{\sqrt{D(ft)}}$$

La velocidad crítica es función de la inversa de la raíz cuadrada del diámetro del molino.

3.6.2. RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS VARIABLES

El diámetro del molino, su velocidad, y el diámetro de los elementos moledores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos moledores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son:

A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).

A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).

A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).

Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

3.6.3. TAMAÑO MÁXIMO DE LOS ELEMENTOS MOLEDORES

En los molinos los elementos moledores no tiene todos los mismos tamaños, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula:

$$M = \sqrt{\frac{F(\mu) Wi}{KCs(\%)} \sqrt{\frac{S(tn/m^3)}{\sqrt{D(ft)}}}}$$

Donde

M = Diámetro máximo de elementos moledores.

F = Tamaño de alimentación del 80 % de la carga.

Wi = Work index, constante adimensional función de la naturaleza del material molido. Se obtiene por tablas.

K = Constante adimensional que vale: Bolas = 200, Barras = 300.

Cs = Porcentaje de la velocidad crítica.

S = Peso específico del material a moler.

D = Diámetro interno del molino.

Luego, ingresando en tablas con el tamaño máximo de elementos moledores, se obtiene la distribución porcentual y los respectivos diámetros de los componentes para efectuar la molienda.

3.6.4. VOLUMEN DE CARGA

Los molinos de bolas no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del cilindro del molino, es lo que se denomina Volumen de Carga:

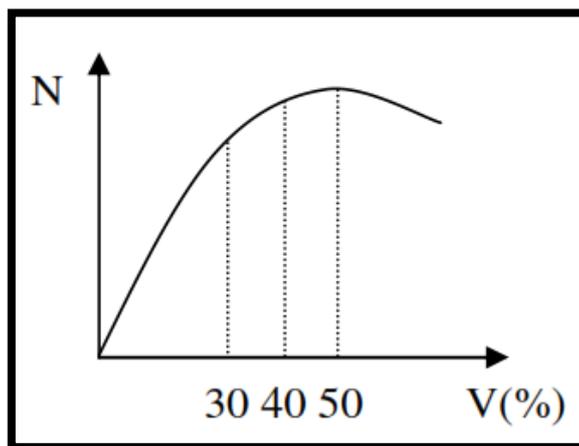
$$V (\%) = \frac{(V_{material\ a\ moler} + V_{elementos\ moledores})}{V_{interior\ del\ cilindro}} * 100$$

Habitualmente es del 30 % al 40 %, y de este volumen, el material a moler ocupa entre una 30 % a un 40 %.

3.6.5. POTENCIA

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es del 50 % aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30 % y un 40 % ya que como la curva es bastante plana, la potencia entregada es similar a la del 50 %.

Figura N° 3.2: Curva de potencia



Fuente: Arthur Taggarth

3.6.6. Tipos de Molienda: Molienda Húmeda y Molienda Seca

La molienda se puede hacer a materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda Húmeda. Es habitual que la molienda sea **seca** en la fabricación del cemento Portland y que sea **húmeda** en la preparación de minerales para concentración.

En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas en cañerías. En la molienda húmeda moderna, luego del proceso de desintegración, la clasificación de partículas se llevará a cabo en hidrociclones y si se desea concentrar el mineral se podrá hacer una flotación por espumas. El líquido, además, tiene un efecto refrigerante con los calores generados en el interior.

Tabla N° 3.2: Comparación del funcionamiento de molinos

Molienda Húmeda	Molienda Seca
Requiere menos potencia por tonelada tratada	Requiere más potencia por tonelada tratada
No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos	Si requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos
Consume más revestimiento (por corrosión)	Consume menos revestimiento

Fuente: Elaboración propia

El molino de Bolas, análogamente al de Barras, está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior tiene bolas libres. El cuerpo gira merced al accionamiento de un motor, el cual mueve un piñón que engrana con una corona que tiene el cuerpo cilíndrico.

Las bolas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción y percusión.

El material a moler ingresa por un extremo y sale por el opuesto. Existen tres formas de descarga: por rebalse (se utiliza para molienda húmeda), por diafragma, y por compartimentado (ambas se utilizan para molienda húmeda y seca).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. DISEÑO DEL MOLINO DE BOLAS.

4.1.1. CÁLCULO DE CAPACIDAD.

Datos básicos:

Tamaño de planta: 15,674 Toneladas de grava por año.

Capacidad del molino: Considerando 330 días por Año
tenemos:

$$\frac{15\,674 \text{ toneladas}}{330 \text{ dias}} = 47,5 \frac{t}{\text{día}}$$

47.5 ton/día. Se le da un 10% de producción extra, esto nos da
lo siguiente:

$$47,5 \times 10 \% = 47,5 \times 0,10 = 4,75 \text{ t.}$$

$$47,5 + 4,75 = 52,25 \text{ t/día.}$$

$$52,25 \text{ t/día} \times 330 \text{ días} = 17,242.5 \text{ t de mineral por año.}$$

El tiempo de trabajo del molino será de 20 horas diarias. Por lo que tenemos:

$$330 \text{ días} \times 20 \text{ horas} = 6600 \text{ horas al año.}$$

$$\text{Producción del molino} = \frac{17\,242,5}{6600} = 2,6125 \text{ t/hora}$$

Moliendabilidad de la matriz cuarzosa se considera 20 Kw-h/t.

Este dato se tomó como referencia del consumo total de la energía eléctrica por otros molinos semejantes en la industria.

4.1.2. CÁLCULO DE POTENCIA DEL MOTOR.

$$\text{Potencia del motor del molino} = 20 \text{ kw-h/t} \times 2,6125 \text{ t/hora} = 52,25 \text{ kw.}$$

De donde: Usando un F.S. = 1,3410

$$\text{Potencia del motor} = 52,25 \times 1,3410 = 70 \text{ HP.}$$

Este valor se toma para determinar el tipo de motor utilizado, por lo que utilizaremos un motor con los siguientes datos de placa:

Marca: ABB

Modelo: M3000 Hierro Fundido

Código del producto: 3GBP283 – 220 ASG.

Potencia = 75 HP = 55 kw.

RPM = 1150

Torque = 531 Nm.

Momento de inercia: $J = 2,2$

Peso: $W = 650$ kg.

Factor de potencia = 0,84

Eficiencia: al 100 % = 94,6

Nivel de ruido = 66 dB.

Alimentación: trifásico 440 – 480 v. – 60 H.

Ver anexo I

4.1.3. SELECCIÓN DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD.

Posteriormente utilizaremos un reductor de velocidad el cual alimentara a toda la transmisión con los siguientes datos de placa:

Potencia de entrada = 75 HP.

Velocidad de salida = 152 RPM.

Potencia de salida = 70 HP.

De la marca = R.A.I.S.A.

Modelo GS – 254 con salida izquierda.

Ver anexo II

4.2. EXPRESIÓN DE DAWN PARA DIMENSIONAMIENTO DEL MOLINO.

Usando la expresión DAWN: $k_w \text{ netos} = 0,284 \text{ DAWN}$

En donde $k_w \text{ netos}$ es la potencia solamente requerida por el molino, sin tomar en cuenta pérdidas en el motor y en la transmisión.

En donde:

D = Es el diámetro del molino, dentro del emplacado (m).

A = Es (1,073); Es la fracción de carga del volumen del molino.

W = Es el peso de la bola en toneladas.

N = Es la Velocidad del molino en RPM.

Esta expresión es empírica y se ha desarrollado con el paso de los años. Sustituyendo estos valores en la fórmula o expresión se tiene:

$$K_w \text{ netos} = 0,284 D (1,073 - J) WN.$$

Para obtener las dimensiones del molino, todos los parámetros deben ser expresados en términos de "D".

4.2.1. CÁLCULO DE VELOCIDAD DEL MOLINO.

La velocidad del molino normalmente se calcula como un porcentaje de la velocidad crítica (N_c), la cual se define como la velocidad en la que la carga de bola empieza a centrifugar.

La velocidad crítica se puede calcular como una función del diámetro del molino.

$$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D}}$$

El rango normal de la velocidad del molino varía entre 70 y 80 % de la velocidad crítica por lo que tomando la expresión.

$$N = 75 \% N_c = \frac{31,65}{\sqrt{D}}$$

La forma del molino de bolas se expresa en términos de la relación longitud a diámetro L/D, usando la longitud efectiva del molino y el diámetro dentro del emplacado para efecto del cálculo, por lo que tomaremos una relación de 2,35:1.

4.2.2. VOLUMEN DE CARGA Y PESO DE LA BOLA.

El volumen de carga depende hasta cierto punto del tipo de molino. El cálculo se basa en determinar el tamaño del molino y el volumen de carga necesario para usar la potencia requerida de modo de obtener la meta de producción.

Para encontrar el tamaño del molino se debe seleccionar un valor para el volumen de carga (J). Para este tipo de molino un valor del 28% es aceptable. Se ha encontrado en la práctica que con más de 30% se pierde eficiencia.

El peso de la bola se relaciona con el % de volumen de carga.

Peso de la bola = W = volumen del molino x J x densidad de la bola.

La densidad convencional usada para la bola es de 4.48 t/m³

En este caso:

$$W = \frac{\pi}{4} D^2 \times 2,35 \times D \times 0,28 \times 4,48$$

$$W = 2,315 D^3 \text{ toneladas}$$

Los KW netos es la potencia a la entrada del molino y se calcula a partir de la potencia a la entrada del motor incluyendo pérdidas en el motor y transmisión.

Si este dato no se tiene disponible, un factor seguro para convertir potencia de alto (gross) a neto es de 0,9.

De donde.

$$Kw \text{ netos} = 0,9 \times 75 \times 0,746 = 50,355 \text{ kw.}$$

Por lo tanto:

$$Kw_{netos} = 0,284 D (1,073 - 0,289 \times 2,315 D^3) * \frac{31,65}{\sqrt{D}}$$

Sustituyendo el valor KW netos en esta expresión tenemos:

$$50,355 \text{ kw} = 16,538 D^{3,5}$$

En donde:

$$D^{3,5} = \frac{50,355}{16,538} = 3,044$$

$D^{3,5} = 3,044$; sacando $\sqrt[3,5]{\quad}$ a ambos términos:

$$D^{3,5 \times 1/3,5} = \sqrt[3,5]{3,044}$$

$$D = 3,044^{1/3,5} = 1,37 \text{ m entre emplacado}$$

El diámetro entre paredes es de 1,5 m. Dejando 65 mm., como espesor del emplacado en cada pared.

Para obtener la longitud del molino de la relación $L/D = 2,35$ despejamos a L y tenemos lo siguiente:

$L = 2,35 \times D$, sustituyendo el valor de D tenemos:

$$L = 2,35 \times 1,37 = 3,2195 \text{ m.}$$

$$N = \frac{31,65}{\sqrt{D}} = \frac{31,65}{\sqrt{1,37}} = 27,04$$

$$N = 27,04 \text{ RPM.}$$

Por lo que:

$$kw_{netos} = 0,284 \times 1,37 (1,037 - 0,28) 2,315 \times 1,37^3 \frac{31,65}{\sqrt{1,37}}$$

Kw netos = 49,6 kw netos es la energía neta consumida en el molino.

Usaremos un 5 % de los KW netos correspondientes a causa de pérdidas en el motor, cojinetes, reductor, en general:

$$49,66 \times 0,05 = 2,483 \text{ kw}$$

De donde kw bruto = 49,66 + 2,483 = 52,143 kw = 69,92 HP = 70 HP, lo cual concuerda con el cálculo.

4.2.3. VELOCIDAD CRÍTICA DE ROTACIÓN.

Es aquella en que la fuerza centrífuga anula la influencia que la gravedad opera sobre las bolas que caen y, por lo tanto no prestan ningún servicio de molienda.

La velocidad crítica está dada por la fórmula:

$$n = \frac{K}{\sqrt{D}}$$

Donde:

D = diámetro libre del molino, para este caso D = 1,37 m.

K = 76.6 cuando está expresado en pies y 42.3 cuando está en m.

Entonces tenemos que:

K = 76.6 cuando está expresado en pies y 42.3 cuando está en m.

Entonces tenemos que:

$$n = \frac{42,3}{\sqrt{1,37}} = \frac{42,3}{1,17} 36,15 \text{ RPM}$$

Este es el valor de la velocidad de rotación crítica en rpm, en el cual las bolas no realizan ningún trabajo útil.

El movimiento de las bolas tiene una considerable influencia de molienda, si el molino gira muy rápido las bolas pueden elevarse muy alto y entonces cuando caen pueden no pegar en la carga del molino sino caer sobre las placas del blindaje libres, disipando así innecesariamente la energía, alternativamente, el impacto puede ser excesivo, originando una sobre molienda con la consiguiente compactación y reaglomeración del material ya molido. Para mayores velocidades las bolas pueden centrifugarse y cesar por lo tanto a la molienda.

Para saber la velocidad real óptima del molino en rpm que práctica se aplica de modo general, está comprendida entre el 45 - 80 % de la velocidad crítica, para nuestro diseño se tomara el 48 % entonces tenemos que la velocidad real óptima de nuestro molino es:

Velocidad real óptima = velocidad crítica x 0,5

Velocidad real óptima = $36,15 \times 0,48 = 17,5$ RPM

La cual es equivalente a la velocidad de diseño del molino en RPM.

4.3. CANTIDAD Y TIPO DE CUERPOS MOLEDORES DISTRIBUIDOS EN LA CÁMARA DE MOLIENDA.

Se usaran bolas de acero en los siguientes diámetros y cantidades según datos establecidos por la compañía ALLIS (MINERAL SYSTEMS), cuyos diseños y datos tabulados de cantidades de bolas y características. Siguiendo las dimensiones de sus diferentes molinos, y tomando el más parecido que es el modelo M.B.32.

Se obtienen las siguientes características para las bolas:

Tabla N° 4.1: Tamaño de bolas Vs. Teso de bolas

Tamaño de bola (mm)	Cantidad requerida (toneladas)
90	0,98
80	1,83
60	1,887
50	1,3

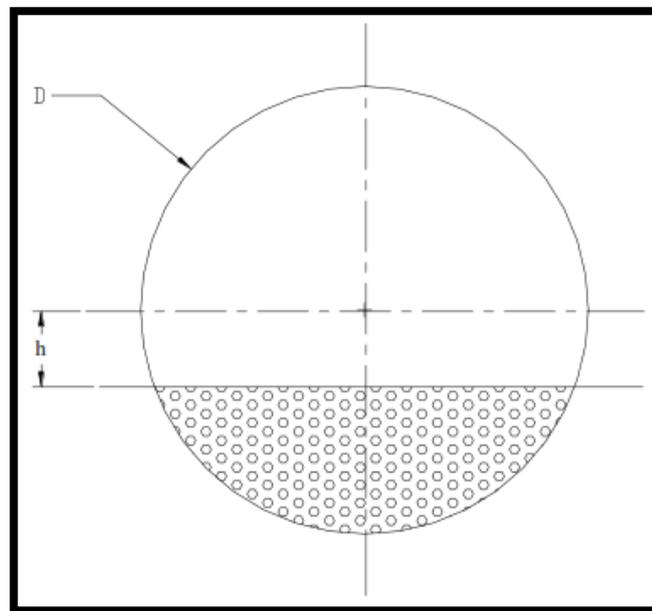
Fuente: Arthur Taggarth

Cantidad total requerida = 6 toneladas

4.3.1. CONSIDERACIONES DE LLENADO.

Según L. Lewenson el llenado óptimo de los molinos debe ser tal que $h = 0,16D$.

Figura N° 4.1: Altura de llenado de medio molturante (bolas)



Fuente: Elaboración propia

Para nuestro caso $D = 1,37$ m por lo tanto $h = 0,16 \times 1,37 = 0,21$ m

4.3.2. GRADO DE LLENADO DE BOLAS EN EL MOLINO:

Es la relación entre el volumen del apilamiento de las bolas y el volumen de trabajo o volumen libre del molino. El grado

de llenado para bolas de acero, varía entre 28 % al 45 %. Por debajo del 28 % de llenado, los cuerpos moledores se deslizan sobre el blindaje del molino, por encima del 45% de llenado se originan dificultades en las trayectorias de caída de los cuerpos moledores.

$$\text{Grado de llenado} = \frac{\text{Volumen ocupado por la bola}}{\text{volumen libre del molino}}$$

$$\text{Volumen ocupado por la bola} = \frac{\text{carga total bola}}{\text{Densidad de bola}}$$

Densidad bolas grandes: 4,3 ton/m³

Carga total = 6 ton

Sustituyendo valores en:

$$\text{Volumen ocupado bola} = \frac{6}{4,3} = 1,43 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen libre} = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

Como sabemos:

Diámetro = D = 1,37 m.

Longitud = L = 3,21 m.

Sustituyendo los valores en el volumen libre tenemos que:

$$\text{Volumen libre} = \frac{\pi}{4} 1,37^2 \times 3,21 = 4,37 \text{ m}^3$$

Sustituyendo estos valores en el grado de llenado tenemos que:

$$\text{Grado de llenado} = \frac{1,4}{4,73} = 0,29$$

% grado de llenado = $0,29 \times 100 = 29 \%$.

$$n_p = \frac{N}{R_v+1} = \frac{174}{8,6+1} = 18 \text{ dientes}$$

$$R_v = \frac{N_{motor}}{N_{máquina}} = \frac{152}{17,5} = 8,6$$

Calculando número de dientes del engranaje:

$$N_e = N - n_p = 174 - 18 = 156 \text{ dientes}$$

Definiendo la relación de velocidad real:

$$R_v = \frac{n_e}{n_p} = \frac{156}{18} = 8,6$$

Calculando el diámetro de peso:

$$Dp_p = \frac{n_p}{P} = \frac{18}{1,5} = 12 \text{ pulgadas}$$

$$Dp_e = \frac{n_e}{P} = \frac{156}{1,5} = 104 \text{ pulgadas}$$

Comprobando distancia entre centros:

$$C = \frac{Dp_p + Dp_n}{2} = \frac{104+12}{2} = 58 \text{ pulgadas}$$

Factor de forma:

Factor de forma del piñón de 18 dientes

$$Y = 0.308$$

Factor de forma del engrane de 156 dientes

$$Y = 0.4586$$

Defiendo materiales del piñón y engrane:

Tabla N° 4.2: Tipo de material a emplear

Pieza	Material	S	BHN
Piñón	ASTM 35	12 000	212
Engranaje	ASTM 50	15 000	223

Fuente: Arthur Taggarth

Determinando el elemento más débil:

$$\text{Piñón} = S_o Y = 12\,000 \times 0,308 = 3696 \text{ PSI}$$

$$\text{Engranaje} = S_o Y = 15\,000 \times 0,4586 = 6879 \text{ PSI}$$

Calculando velocidad lineal:

$$v = \frac{\pi D n}{12} = \frac{\pi \times 12 \times 152}{12} = 477,52 \text{ RPM}$$

Calculando carga transmitida:

$$f_t = \frac{33000 \times n}{v} = \frac{33000 \times 70,5}{477,52} = 4872,047 \text{ lb}$$

Calculando carga dinámica para un tallado comercial:

$$f_d = \left(\frac{600+v}{600} \right) f_t = \left(\frac{600+477,52}{600} \right) 4872,0471 = 8749,54 \text{ lb}$$

Factor de concentración de esfuerzo:

$$K_f = 1,7 \text{ (para una machacadora de roca)}$$

Calculando ancho de cara:

$$b = \frac{f_d \times k_f \times P}{S_o Y} = \frac{8749,54 \times 1,7 \times 1,5}{12\,000 \times 0,308} = 6,036$$

Comprobando el ancho de cara:

$$\frac{8}{P} < b < \frac{12,5}{P} \rightarrow \frac{8}{1,5} < 6,036 < \frac{12,5}{1,5} \rightarrow 5,33 < 6,036 <$$

8,33

Cumple con la condición

Cálculo por desgaste.

Calculando F_d :

$F_s > N F_s F_d$

$$F_d = F_t + \frac{0,05v(bc+ft)}{0,05v+(bc+ft)^{1/2}}$$

$$F_d = 4872,047 + \frac{0,05(477,52)[(6,036)(58)+4872,047]}{0,05(477,52)+ [(6,036)(58)+4872,047]^{1/2}}$$

$F_d = 6168,9441 \text{ lb}$

$$NF_s = \frac{F_s}{F_d} = \frac{8749,54}{6168,9441} = 1,4183$$

Calculo de la fuerza límite de desgaste F_w :

$Ses = 400 \text{ BHN} - 10000 = 400(212) - 10000$

$Ses = 74800 \text{ PSI}$

$$K = \frac{Ses^2 \text{sen}20}{1,4} \left(\frac{1}{Eg} + \frac{1}{Ep} \right)$$

$$K = \frac{(74800)^2 \times 0,342}{1,4} \left(\frac{2}{29 \times 10^6} \right)$$

$K = 94,261$

$$Q = \frac{2Ng}{Np+Ng}$$

$$Q = \frac{2(156)}{18+156} = 1,7931$$

$F_w = DPkQ$

$F_w = (12)(6,036)(94,261)(1,7931) = 12242,41312$

$F_w > F_d$

Por lo que el cálculo es satisfactorio.

Cálculo de la geometría de los engranajes:

Para el piñón:

$d = 12$ pulgadas

$N = 18$ dientes

$$P_c = \frac{\pi d}{N} = \frac{\pi 12}{18} = 2,094$$

$$P_d = \frac{N}{d} = \frac{18}{12} = 1,5$$

$P_d < 20$, Paso fino según tabla

Especificaciones de dientes AGMA de profundidad total

Ángulo de presión $\phi = 20^\circ$ o 25°

$$\text{Altura de la cabeza } a = \frac{1,0}{P_d} = \frac{1,0}{1,5} = 0,666$$

$$\text{Altura de raíz } b = \frac{1,250}{P_d} = \frac{1,250}{1,5} = 0,8333$$

$$\text{Profundidad de trabajo} = \frac{2,0}{P_d} = \frac{2,0}{1,5} = 1,333$$

$$\text{Profundidad total} = \frac{2,250}{P_d} = \frac{2,250}{1,5} = 1,5$$

$$\text{Espesor circular del diente} = \frac{1,571}{P_d} = \frac{1,571}{1,5} = 1,047$$

$$\text{Radio del filete – cremallera básica} = \frac{0,30}{P_d} = \frac{0,30}{1,5} = 0,2$$

$$\text{Holgura básica mínima} = \frac{0,250}{P_d} = \frac{0,250}{1,5} = 0,166$$

$$\text{Ancho mínimo en la cresta superior} = \frac{0,250}{P_d} = \frac{0,250}{1,5} =$$

0,166

$$\text{Holgura (dientes rasurados o rectificadas)} = \frac{0,350}{Pd} =$$

$$\frac{0,350}{1,5} = 0,233$$

$$\text{Altura total del diente} = a + b = 0,666 + 0,833 = 1,49$$

$$C = b - a = 0,833 - 0,666 = 0,167$$

$$\text{Altura de trabajo} = a + b - c = 0,666 + 0,833 - 0,167 = 1,33''$$

$$\text{Diámetro exterior } D_{op} = d_p + 2a = 12 + 2(0,666) = 13,332''$$

$$d_p = \frac{N}{Pd} = \frac{18}{1,5} = 12$$

$$\text{Paso base } P_b = P_c \cos \emptyset = 2,094 (\cos 20^\circ) = 1,96''$$

Para el engranaje:

$$d = 104 \text{ pulgadas}$$

$$N = 156 \text{ dientes}$$

Paso circular

$$P_c = \frac{\pi d}{N} = \frac{\pi(104)}{156} = 2,094$$

Paso diametral

$$Pd = \frac{N}{d} = \frac{156}{104} = 1,5$$

$Pd < 20$ Paso fino según tabla

Especificaciones de dientes AGMA de profundidad total

Ángulo de presión $\emptyset = 20^\circ$ o 25°

$$\text{Altura de la cabeza } a = \frac{1,00}{Pd} = \frac{1,00}{1,5} = 0,666$$

$$\text{Altura de la raíz } b = \frac{1,250}{Pd} = \frac{1,250}{1,5} = 0,833$$

$$\text{Profundidad de trabajo} = \frac{2,00}{Pd} = \frac{2,00}{1,5} = 1,333$$

$$\text{Profundidad total} = \frac{2,250}{Pd} = \frac{2,250}{1,5} = 1,5$$

$$\text{Espesor circular del diente} = \frac{1,571}{Pd} = \frac{1,571}{1,5} = 1,047$$

$$\text{Radio del filete – cremallera básica} = \frac{0,300}{Pd} = \frac{0,300}{1,5} = 0,2$$

$$\text{Holgura básica mínima} = \frac{0,250}{Pd} = \frac{0,250}{1,5} = 0,166$$

$$\text{Ancho mínimo en la cresta superior} = \frac{0,250}{Pd} = \frac{0,250}{1,5} =$$

0,166

$$\text{Holgura (diente rasurados o rectificadas)} = \frac{0,350}{Pd} =$$

$$\frac{0,350}{1,5} = 0,233$$

$$\text{Altura total del diente} = a + b = 0,666 + 0,833 = 1,49$$

$$C = b - a = 0,833 - 0,666 = 0,167$$

$$\text{Altura de trabajo} = a + b - c = 0,666 + 0,833 - 0,167 = 1,33''$$

$$\text{Diámetro exterior } D_{op} = d_p + 2a = 12 + 2(0,666) = 13,332''$$

$$d_p = \frac{N}{Pd} = \frac{18}{1,5} = 12$$

$$\text{Paso base } P_b = P_c \cos \emptyset = 2,049 (\cos 20^\circ) = 1,96''$$

Para el engranaje:

$$d = 104 \text{ pulgadas}$$

$$N = 156 \text{ dientes}$$

Paso circular

$$Pc = \frac{\pi d}{N} = \frac{\pi(104)}{156} = 2,094$$

Paso diametral

$$Pd = \frac{N}{d} = \frac{156}{104} = 1,5$$

$Pd < 20$ Paso fino según tabla

Especificaciones de diente AGMA de profundidad total

Ángulo de presión $\emptyset = 20^\circ$ o 25°

$$\text{Altura de cabeza } a = \frac{1,000}{Pd} = \frac{1,000}{1,5} = 0,666$$

$$\text{Altura de raíz } b = \frac{1,250}{Pd} = \frac{1,250}{1,5} = 0,833$$

$$\text{Profundidad de trabajo} = \frac{2,00}{Pd} = \frac{2,00}{1,5} = 1,333$$

$$\text{Profundidad total} = \frac{2,250}{Pd} = \frac{2,250}{1,5} = 1,5$$

$$\text{Espesor circular del diente} = \frac{1,571}{Pd} = \frac{1,571}{1,5} = 1,047$$

$$\text{Radio del filete – cremallera básica} = \frac{0,300}{Pd} = \frac{0,300}{1,5} = 0,2$$

$$\text{Holgura básica mínima} = \frac{0,250}{Pd} = \frac{0,250}{1,5} = 0,166$$

$$\text{Ancho mínimo en la cresta superior} = \frac{0,250}{Pd} = \frac{0,250}{1,5} =$$

0,166

$$\text{Holgura (dientes rasurados o rectificadas)} = \frac{0,350}{Pd} =$$

$$\frac{0,350}{1,5} = 0,233$$

Altura total del diente = $a + b = 0,666 + 0,833 = 1,49$

$$c = b - a = 0,833 - 0,666 = 0,167$$

$$\text{Altura de trabajo} = a + b - c = 0,666 + 0,833 - 0,167 = 1,33''$$

$$\text{Diámetro exterior } D_{op} = d_p + 2a = 104 + 2(0,666) = 105,33''$$

$$d_p = \frac{N}{P_d} = \frac{156}{1,5} = 104$$

$$\text{Paso base } P_b = P_c \cos \emptyset = 2,094(\cos 20^\circ) = 1,96''$$

Para el piñón y el engranaje

Radio de paso:

$$r_p = \frac{d_p}{2} = \frac{104}{2} = 52$$

$$r_g = \frac{d_g}{2} = \frac{12}{2} = 6$$

Distancia nominal entre centros

$$C_c = r_p + r_g = 52 + 6 = 58''$$

Razón de contacto

$$Z = \sqrt{(r_p + a_p)^2 - r_p(\cos \emptyset)^2} + \sqrt{(r_g + a_p)^2 - r_g(\cos \emptyset)^2} - c \operatorname{sen} \emptyset$$

$$Z =$$

$$\sqrt{(52 + 0,666)^2} - 52(\cos 20^\circ)^2 + \sqrt{((6 + 0,666)^2} - 6(\cos 20^\circ)^2 -$$

$$58 \operatorname{sen} 20^\circ$$

$$Z = 3,366''$$

$$m_p = \frac{Z}{P_b} = \frac{3,366}{1,5} = 2,244$$

Calculo de la flecha

Datos:

Potencia = 70 HP

N = 152 RPM

Piñón = 20°

Utilizando un material ASTM A 148 – 58

Su = 50KSI

Sy = 80 KSI

Según las condiciones ASME

$\sigma = 14400$ PSI

$\delta = 10800$ PSI

Momento de torsión:

$$Mt = \frac{63000N}{n} = \frac{63000(70)}{152} = 29013,15 \text{ lb} * \text{pulgada}$$

$T_1 > T_2$

$$\frac{T_1}{T_2} \cong 3$$

$T_1 = 3T_2$

$Mt = Fd$

$Mt = Ft * r$

$$F_t = \frac{Mt}{r} = \frac{29013,15}{6} = 4835,52 \text{ lb}$$

$Mt = (T_1 - T_2)r$

$Ft = T_1 - T_2$

$4835,52 = T_1 - T_2$

$$T_2 = \frac{4835,52}{2} = 2417,76 \text{ lb}$$

$T_1 = 3(2417,76) = 7253,28$

$F_N = T_1 + T_2 + W$

$W = m * g$

$$V = \frac{\pi d^4}{4} b = \frac{\pi(0,304)^2}{4} (0,153) = 1,11 \times 10^{-2} m^3$$

$$Mm = \rho_E * V = 7800 * 1,11 \times 10^{-2} = 86,58 \text{ kg}$$

$$ww = 86,58 \times 9,81 = 849,34N = 190,94 \text{ lb}$$

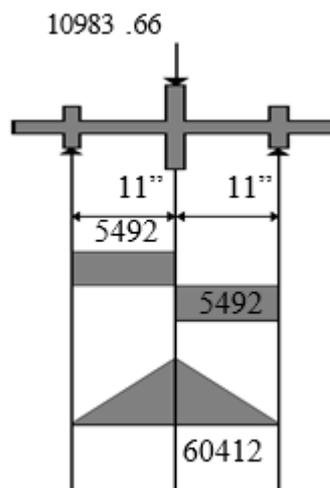
$$F_{NT} = 7253,28 + 2417,76 + 190,94 = 9861,98 \text{ lb}$$

$$F_T = \sqrt{F_t^2 + F_{NT}^2} = \sqrt{(4835,52)^2 + (9861,98)^2} = 10983,66 \text{ lb}$$

Analizando como viga

Plano vertical

$$R_A = R_B = \frac{F_T}{2} = \frac{10983,66}{2} = 5492 \text{ lb}$$



Calculando por criterio

Suponiendo $K_f = K_t = 1,2$

Utilizando un material ASTM A 148 – 58

$S_y = 80 \text{ KSI}$

$$S_u = 50 \text{ KSI}$$

Según las condiciones ASME

$$\sigma = 14400 \text{ PSI}$$

$$\delta = 10800 \text{ PSI}$$

$$d = \left[\frac{16}{\pi \delta} \sqrt{(M_f K_f)^2 + (M_t K_t)^2} \right]^{1/3}$$

$$d = \left[\frac{16}{\pi(10800)} \sqrt{(60412 \times 1,2)^2 + (29013,15 \times 1,2)^2} \right]^{1/3}$$

$$d = 3,36'' \cong 4''$$

Análisis por SODERBERG

ASTM A148 – 58

$$S_y = 80 \text{ KSI}$$

$$S_u = 50 \text{ KSI}$$

$$S_n = 35 \text{ KSI}$$

$$N = 3$$

$$C_s = 0,9$$

$$C_r = 0,75$$

$$C_m = 0,8$$

$$S_n' = 18900 \text{ PSI}$$

$K_t = 1,6$ cuñero deslizable

$$d = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M_f}{S_n'} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{M_t}{S_u} \right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d = \left[\frac{32 \times 3}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1,6 \times 60412}{18900} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{29013,15}{50 \times 10^3} \right)^2} \right]^{1/3}$$

$$d = 5,39'' \cong 5,5''$$

$$\frac{D}{d} = 1,5$$

$$D = 1,5d = (1,5)(5,39) = 8,085''$$

$$\frac{r}{d} = 0,17$$

$$r = 0,17d = 0,17(5,39) = 0,9163''$$

Deformación angular

$$\theta = \frac{MtL}{GJ}$$

$$J = \frac{\pi D^4}{32} = \frac{\pi(8,085)^4}{32} = 419,48 \text{inche}^4$$

$$E = 200\text{GPa} = 29 \times 10^6 \text{PSI}$$

$$G = \frac{E}{2} = \frac{29 \times 10^6}{2} = 14,5 \times 10^6$$

$$\theta = \frac{29013,15 \times 22}{14,5 \times 10^6 (419,48)} = (1,049 \times 10^{-4}) \text{pie}$$

Deformación lateral

$$\Delta \max = \frac{Pl^3}{48EI}$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(8)^4}{64} = 201,06$$

$$\Delta \max = \frac{(10983,66)(22)^3}{(48)(29 \times 10^6)(201,06)} = 4,17 \times 10^{-4} \text{ pulgada}$$

Selección de los cojinetes de bolas para la flecha diseñada.

Datos:

$$R_1 = 5492 \text{lb} = 24429,63 \text{ N}$$

$$R_2 = 5492 \text{ lb}$$

$$d = 5 \frac{1}{2}''$$

$$N_n = 152 \text{ RPM}$$

30000 Horas reales de trabajo

$$B_0 (h)(60)(n) = (30000)(60)(152) = 273600000 \text{ RPM} = 273,6 \text{ Mr}$$

$$F_r = (B)^{1/k} R$$

$$K = 3$$

$$F_r = (273,6)^{1/3}(24429,63) = 158594,79 \text{ N}$$

Dos cojinetes de bolas de una hilera radiales rígidas con:

Número de cojinetes: 6328

PÑerforación = 140 mm = 5,51181 inche

Velocidad limitante = 2000 RPM

Clasificación de carga dinámica = 44000 lb

Clasificación de carga estática = 50000 lb

Ver anexo III

Selección de acoplamientos:

Datos:

Diámetro del eje del motor = $d_p = 2,875'' = 73,025 \text{ mm}$

Diámetro del eje del reductor = $d_m = 2,250'' = 57,15 \text{ mm}$

Diámetro del eje = $d_e = 5,5'' = 139,7 \text{ mm}$

Velocidad del motor = 1150 RPM

Potencia del motor = 75 HP = 55 Kw

Velocidad del reductor = 152 RPM

Potencia del reductor = 70 HP = 51,3 Kw

Determinación del par nominal y los factores de servicio F1, F2 y F3 entre el motor t reductor.

$$Tn = \left(\frac{Pn}{n}\right) \times 9549 = \left(\frac{55}{1150}\right) 9549 Nm$$

$$Tn = 0,46 \text{ KNm}$$

Seleccionando los factores de servicio:

$$F1 = 2,5$$

$$F2 = 1,3$$

$$F3 = 1,25$$

Ver anexo IV

Se calcula el par máximo

$$Tm = Tn \times F1 \times F2 \times F3$$

$$Tm = 0,46 (2,5 + 1,3 + 1,25) \text{KNm}$$

$$Tm = 2,32 \text{ KNm}$$

Se selecciona un acoplamiento tipo PM6

Lo cual cumple las condiciones:

$$Tkm = 6 \text{ KNm}$$

$$Tm < Tkm$$

$$2,32 < 6 \text{ KNm}$$

$n <$ Velocidad máxima del acoplamiento

$$1150 < 4480 \text{ RPM}$$

$$dmin < dp < dmax$$

$$50 < 73,02 < 85$$

$$dmin < dm < dmax$$

$$50 < 57,15 < 85$$

Determinación del par nominal y los factores de servicio F1,F2,F3,
entre el reductor y el eje motriz

$$T_n = \left(\frac{P_n}{n}\right) \times 9549 \text{ Nm} = \left(\frac{51,3}{152}\right) \times 9549 \text{ Nm}$$

$$T_n = 3,22 \text{ KNm}$$

Seleccionando los factores de servicio

$$F_1 = 2,5$$

$$F_2 = 1,3$$

$$F_3 = 1,25$$

VER ANEXO IV

Se calcula el par máximo

$$T_m = T_n \times F_1 \times F_2 \times F_3$$

$$T_m = 3,22 (2,5 + 1,3 + 1,25) \text{ KNm}$$

$$T_m = 16,26 \text{ KNm}$$

Se selecciona un acoplamiento tipo PM 27

Lo cual cumple las condiciones:

$$T_{km} = 27 \text{ KNm}$$

$$T_m < T_{km}$$

$$16,26 < 27 \text{ KNm}$$

$n <$ Velocidad máxima del acoplamiento

$$152 < 2650 \text{ RPM}$$

$$d_{min} < d_m < d_{max}$$

$$92 < 57,15 < 143$$

$$d_{\min} < d_e < d_{\max}$$

$$92 < 139,7 < 143$$

4.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS

La investigación llevada a cabo nos da resultados confiables con ello podemos fabricar un molino tipo prototipo para hacer prácticas de molienda. Se ha obtenido resultados como:

Capacidad: 47,5 t/día

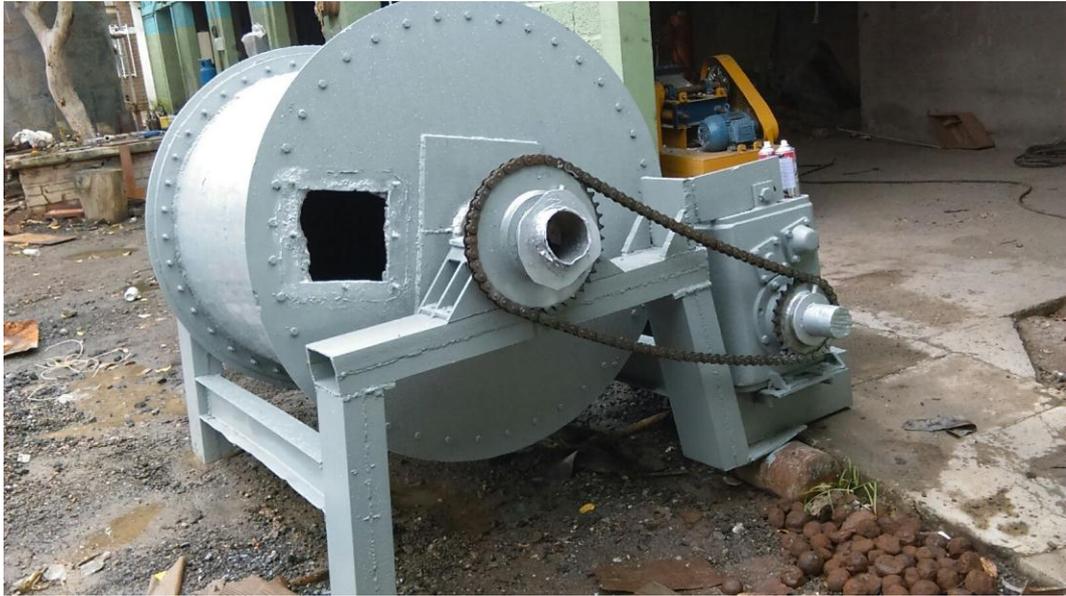
Potencia del motor: /= HP

Velocidad real óptima: 17,5 RPM

Velocidad crítica: 36,15 RPM.

Los parámetros calculados son necesarios para poder llevar a cabo de diseño del molino de bolas.

Figura N° 4.2: Prototipo del molino de bolas



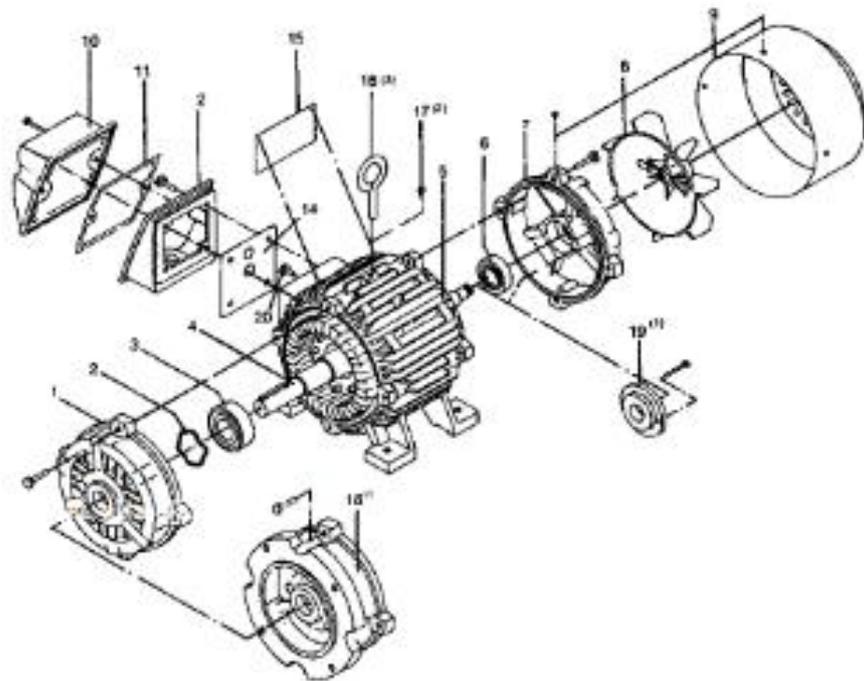
Fuente: Elaboración propia

ANEXO I

Motores trifasicos jaula de ardilla, alta eficiencia, totalmente cerrados						
	Totalmente cerrados con ventilación exterior Montaje: Horizontal (F1) Aislamiento Clase F Diseño Nema B según Norma MG-1 33oC temp. ambiente a una altitud de 2300msnm 40oC temp. ambiente a una altitud de 1000msnm Motores a prueba de explosión para atmósferas de División 1, Clase 1, Grupo D - Clase 2, Grupos F&G			Para otra clasificación, favor de consultarnos. Factor de Servicio: 1.0 Motores RGZZESD 1.15 Motores RGZE y RGZESD 1.25 Motores RGZE y RGZESD Armazones 143T a 256T en 2 y 4 Polos		
	Descripción				Modelo	
Potencia en HP	Velocidad en RPM	Tensión a 60 Hz en Volts	Tamaño Armazón NEMA	RGZE Uso general Catálogo Spiridon	RGZESD Servicio pesado No. de parte	RGZZESD A prueba de explosión Catálogo Spiridon
50	3600	220/440	326TS	1LA00262FE72	1LA00262SE72*	*
	1800	220/440	326T	1LA00264FE71	1LA00264SE71*	*
		220/440	365T	1LA00365FE71	1LA00365SE71*	*
	1150	220/440	404T	"	1LA04048SE71*	*
		220/440	364TS	364TS	1LA003642FE72	1LA003642SE72*
60	900	220/440	364T	1LA003644FE71	1LA003644SE71*	*
		220/440	404T	1LA04046FE71	1LA04046SE71*	*
	3600	220/440	405T	"	1LA04058SE71*	*
		1800	220/440	365TS	1LA003652FE72	1LA003652SE72*
	1150	220/440	365T	1LA003654FE71	1LA003654SE71*	*
220/440		405T	405T	1LA04056FE71	1LA04056SE71*	*
900		440	444T	"	1LA04448SE81*	*
75	3600	220/440	405TS	1LA04052FE72	1LA04052SE72*	*
		220/440	405T	1LA04054FE71	1LA04054SE71*	*
	1800	220/440	444T	"	1LA04446SE81*	*
		460	445T	"	1LA04458SE81*	*
	900	460	444TS	1LA04442FE82	1LA04442SE82*	*
100	3600	460	444T	1LA04444FE81	1LA04444SE81*	*
		460	445T	"	1LA04456SE81*	*
	1800	460	447T	"	1LA04478SE81*	*
		460	445TS	"	1LA04452SE82*	*
	900	460	445T	1LA04454FE81	1LA04454SE81*	*
125	3600	460	447T	"	1LA04476SE81*	*
		460	447T	"	1LA04478SE81*	*
	1800	460	447T	"	1LA04478SE81*	*
		1150	460	447T	"	1LA04478SE81*
	900	460	447T	"	1LA04478SE81*	*
150	3600	460	447T	"	1LA04478SE81*	*
		1800	460	447T	"	1LA04478SE81*
	1150	460	447T	"	1LA04478SE81*	*
		900	460	447T	"	1LA04478SE81*

Lista de partes para motores trifásicos cerrados de alta eficiencia.

1. Escudo soporte de rodamiento, lado accionamiento ("A").
2. Arandela de presión.
3. Rodamiento de bolas lado ("A")
4. Eje con paquete rotor y cu.a espiga
5. Carcasa con paquete estator bobinado.
6. Rodamiento de bolas lado "B"
7. Escudo soporte de rodamiento, lado ventilador ("B").
8. Ventilador de plástico.
9. Capuchón de lámina.
10. Tapa caja de conexiones.
11. Empaque tapa-base caja de conexiones.
12. Base caja de conexiones.
14. Empaque base caja de conex-carcasa.
15. Placa de características.
16. Cáncamo.
17. Tapón para rosca cáncamo.
18. Escudo soporte de rodamiento, con brida "C" o "D".
19. Tapa balero interior lado ventilador ("B").
20. Tornillo de tierra.



Dimensiones de motores horizontales en pulgadas.

NEMA	S	ES	C	D	E	2F	BA	N-W	O	P	H	AB
143T	.188	1.38	12.2	3.50	2.75	4	2.25	2.25	6.93	7.7	.13	6.46
145T	.188	1.38	13.3	3.50	2.75	5	2.25	2.25	6.93	4.7	.13	6.46
182T	.250	1.75	14.2	4.50	3.75	4.50	2.75	2.75	8.86	9.7	.13	7.36
184T	.250	1.75	15.2	4.50	3.75	5.50	2.75	2.75	8.86	9.7	.13	7.36
213T	.313	2.38	18.0	5.25	4.25	5.50	3.50	3.38	10.62	11.2	.13	9.02
215T	.313	2.38	19.1	5.25	4.25	7	3.50	3.38	10.62	11.2	.13	9.02
254T	.375	2.88	22.3	6.25	5	8.25	4.25	4	12.62	13.4	.13	9.92
256T	.375	2.88	24.1	6.25	5	10	4.25	4	12.62	13.4	.13	9.92
284T	.500	3.25	28.8	7	5.50	9.50	4.75	4.63	14.19	15.5	.13	12.94
286T	.500	3.25	28.8	7	5.50	11	4.75	4.63	14.19	15.5	.13	12.94
284TS	.375	1.88	27.5	7	5.50	9.50	4.75	3.25	14.19	15.5	.13	12.94
286TS	.375	1.88	27.5	7	5.50	11	4.75	3.25	14.19	15.5	.13	12.94
324T	.500	3.88	32.0	8	6.25	10.50	5.25	5.25	15.94	17.1	.13	15.75
326T	.500	3.88	32.0	8	6.25	12	5.25	5.25	15.94	17.1	.13	15.75
324TS	.500	2	30.0	8	6.25	10.50	5.25	3.75	15.94	17.1	.13	15.75
326TS	.500	2	30.0	8	6.25	12	5.25	3.75	15.94	17.1	.13	15.75
364T	.625	4.25	34.2	9	7	11.25	5.88	5.88	17.81	18.5	.38	17.69
365T	.625	4.25	34.2	9	7	12.25	5.88	5.88	17.81	18.5	.38	17.69
364TS	.500	2	32.1	9	7	11.25	5.88	3.75	17.81	18.5	.38	17.69
365TS	.500	2	32.1	9	7	12.25	5.88	3.75	17.81	18.5	.38	17.69
404T	.750	5.63	39.5	10	8	12.25	6.625	7.25	19.90	19.6	.13	17.50
405T	.750	5.63	39.5	10	8	13.75	6.625	7.25	19.90	19.6	.13	17.50
404TS	.500	2.75	36.5	10	8	12.25	6.625	4.25	19.90	19.6	.13	17.50

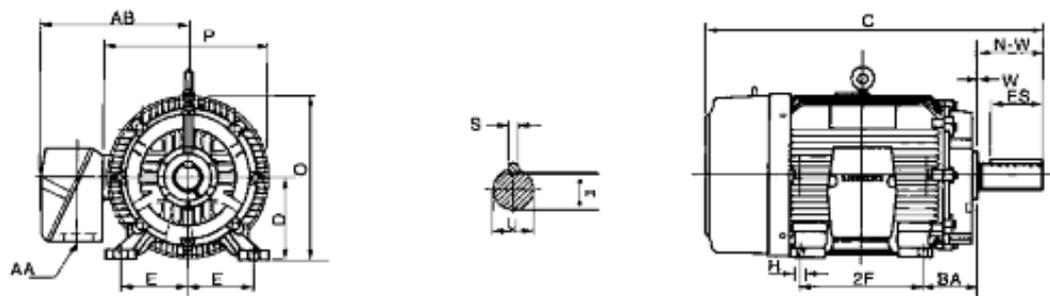


fig. No. 32, dimensionamiento de un motor trifásico cerrado de alta eficiencia

ANEXO II

GS-254 GSA-254 y GSV-254

Reducción nominal	Descripción de la capacidad	Velocidad de entrada		
		1750	1150	870
5	Pot. Entrada HP	108	91.2	79.5
	Pot. Salida HP	103	86.9	76
	Par Salida Kg-cm	21926	26888	28965
	Vel. Salida RPM	350	230	174
7.5	Pot. Entrada HP	89.1	75	65
	Pot. Salida HP	85.5	70	62
	Par Salida Kg-cm	25965	32658	37389
	Vel. Salida RPM	233	152	116
0	Pot. Entrada HP	75	62.6	54.6
	Pot. Salida HP	70	59.2	51.7
	Par Salida Kg-cm	28734	36351	42000
	Vel. Salida RPM	175	115	87
15	Pot. Entrada HP	56.4	46.7	40.9
	Pot. Salida HP	52.3	43.2	37.8
	Par Salida Kg-cm	31965	40043	46257
	Vel. Salida RPM	117	77	58
20	Pot. Entrada HP	43.5	36.1	31.7
	Pot. Salida HP	39.4	32.4	28.3
	Par Salida Kg-cm	33696	42121	48583
	Vel. Salida RPM	88	58	44
25	Pot. Entrada HP	36.9	30	26.9
	Pot. Salida HP	32.9	26.6	23.6
	Par Salida Kg-cm	33581	41197	48583
	Vel. Salida RPM	70	46	35
30	Pot. Entrada HP	31.7	26.2	23.2
	Pot. Salida HP	28.1	22.9	20.2
	Par Salida Kg-cm	34504	42698	49852
	Vel. Salida RPM	58	38	29
40	Pot. Entrada HP	23.7	19.8	17.6
	Pot. Salida HP	20.1	16.5	14.4
	Par Salida Kg-cm	33466	41774	48468
	Vel. Salida RPM	44	29	22
50	Pot. Entrada HP	19	15.8	14.1
	Pot. Salida HP	15.5	12.7	11.2
	Par Salida Kg-cm	32312	40159	46621
	Vel. Salida RPM	35	23	17

MODELO	PESO	CAP	MAT
127	89	2	Fundición Fo.Fo.
152	114	3	Fundición Fo.Fo.
178	162	5.5	Fundición Fo.Fo.
203	238	6	Fundición Fo.Fo.
228	325	8	Estructurado (Fierro)
254	415	10	Estructurado (Fierro)
305	650	12	Estructurado (Fierro)

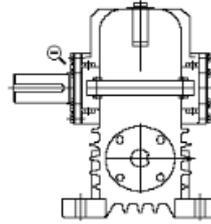


fig. No. 33, vista lateral del reductor de velocidad

MODELO	A	B	C	D	E (ø)	F (Cuñero)	G	H	U	W	V
127	18 15/32 469.11	9 11/16 246.06	8 25/32 223.04	2 19/32 65.88	1.375 34.93	5/16x5/32x2-1/4	9 1/2 241.30	12 304.80	15 1/2 393.70	16 7/16 417.51	1 1/2 38.10
152	20 7/16 519.11	10 1/2 266.70	9 15/16 252.41	2 3/4 69.85	1.500 38.10	3/8x3/16x2-3/16	10 7/16 265.11	14 1/4 361.95	17 3/4 450.85	18 5/8 473.08	1 9/16 39.69
178	22 5/8 574.68	11 1/8 282.58	11 1/2 292.10	3 1/4 82.55	1.625 41.28	3/8x3/16x3	12 304.80	15 1/2 393.70	19 5/8 498.48	21 3/16 538.16	1 1/4 31.75
203	25 1/8 638.18	12 1/2 317.50	12 5/8 320.68	3 9/16 90.49	1.875 47.63	1/2x1/4x3-1/8	13 1/2 342.90	17 1/2 444.50	22 558.80	23 5/8 600.08	1 3/4 44.45
228	28 9/16 725.40	14 5/16 363.54	14 3/4 361.95	4 1/4 107.95	2.125 53.98	1/2x1/4x3-7/8	15 1/2 393.70	19 1/2 495.30	24 1/2 622.30	25 635.00	1 7/8 47.63
254	30 7/16 773.11	14 359.41	15 1/2 393.70	4 3/8 111.13	2.250 57.15	1/2x1/4x3-5/8	17 1/2 444.50	21 3/4 552.45	27 3/8 695.33	28 3/4 730.25	2 50.80
305	34 3/4 882.65	16 3/4 425.45	18 457.20	5 1/2 139.70	2.500 63.50	5/8x5/16x4-1/2	21 533.40	25 1/4 641.35	31 1/2 800.10	32 812.80	2 1/4 57.15

Nota: Las dimensiones están dadas en pulgadas (superior) y milímetros (inferior), la capacidad se entiende en litros y el peso en kilogramos.

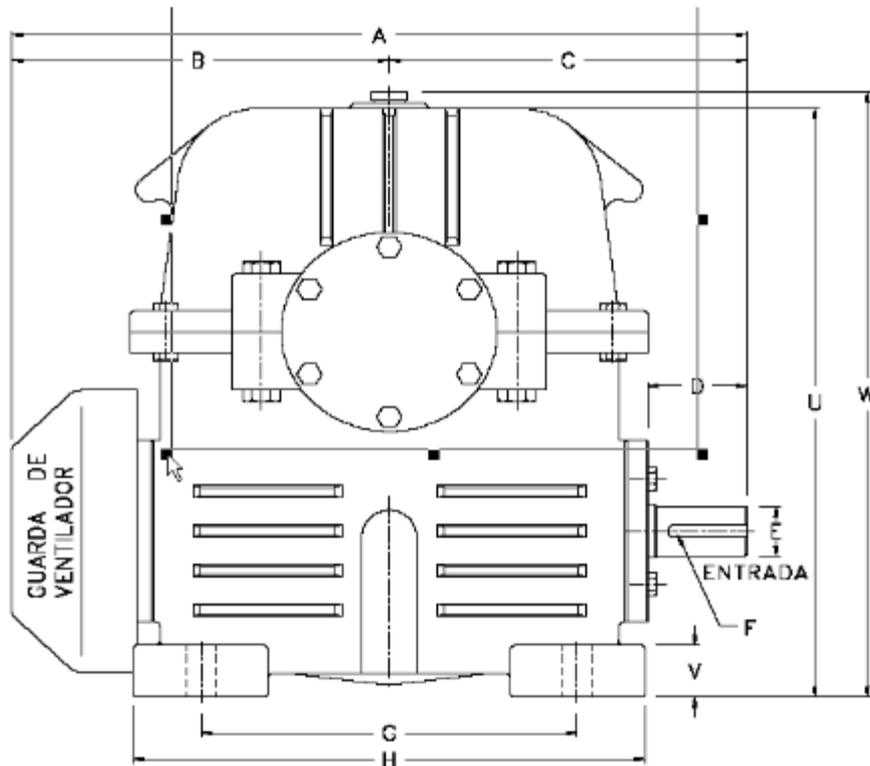


fig. No. 34, dimensionamiento del reductor de velocidad

NUMERO DE COJINETE	DIMENSIONES LÍMITE						DIMENSIONES DE CHAVETA CIRCULAR			RADIO DE FILETE MÁXIMO Flecha y careza in	PESO APROX. lb	VELOCIDAD LIMITANTE rpm	CLASIFICACION DE CARGA DINAMICA lb	CLASIFICACION DE CARGA ESTATICA lb
	Perforación		Diámetro exterior		Ancho		in							
	mm	in	mm	in	mm	in	H	S	t					
6300	10	.3937	35	1.3780	11	.4331	.125	1.562	.044	.025	.13	22000	1400	850
6301	12	.4724	37	1.4567	12	.4724	.125	1.625	.044	.040	.15	20000	1700	1040
6302	15	.5906	42	1.6535	13	.5118	.125	1.821	.044	.040	.20	18000	1930	1200
6303	17	.6693	47	1.8504	14	.5512	.141	2.074	.044	.040	.25	16000	2320	1460
6304	20	.7874	52	2.0472	15	.5906	.141	2.276	.044	.040	.34	14000	3000	1930
6305	25	.9843	62	2.4409	17	.6693	.195	2.665	.067	.040	.58	11000	3800	2550
6306	30	1.1811	72	2.8346	19	.7480	.195	3.091	.067	.040	.83	9500	5000	3400
6307	35	1.3780	80	3.1496	21	.8268	.195	3.406	.067	.060	1.07	8500	5700	4000
6308	40	1.5748	90	3.5433	23	.9055	.226	3.799	.097	.060	1.41	7500	7350	5300
6309	45	1.7717	100	3.9370	25	.9843	.226	4.193	.097	.060	1.95	6700	9150	6700
6310	50	1.9685	110	4.3307	27	1.0630	.226	4.587	.097	.080	2.50	6000	10600	8150
6311	55	2.1654	120	4.7244	29	1.1417	.271	5.104	.111	.080	3.30	5300	12900	10000
6312	60	2.3622	130	5.1181	31	1.2205	.271	5.498	.111	.080	3.81	5000	14000	10800
6313	65	2.5591	140	5.5118	33	1.2992	.304	5.892	.111	.080	4.64	4500	16000	12500
6314	70	2.7559	150	5.9055	35	1.3780	.304	6.286	.111	.080	5.68	4300	18000	14000
6315	75	2.9528	160	6.2992	37	1.4567	.304	6.679	.111	.080	6.60	4000	19300	16300
6316	80	3.1496	170	6.6929	39	1.5354	.346	7.198	.122	.080	9.53	3800	21200	18000
6317	85	3.3465	180	7.0866	41	1.6142	.346	7.593	.122	.100	11.00	3400	21600	18600
6318	90	3.5433	190	7.4803	43	1.6929	.346	7.986	.122	.100	11.60	3400	23200	20000
6319	95	3.7402	200	7.8740	45	1.7717	.346	8.380	.122	.100	13.38	3200	24500	22400
6320	100	3.9370	215	8.4646	47	1.8504	-	-	-	.100	16.34	3000	28500	27000
6321	105	4.1338	225	8.8582	49	1.9291	-	-	-	.100	17.8	2800	30500	30000
6322	110	4.3307	240	9.4488	50	1.9685	-	-	-	.100	21.0	2600	32500	32500
6324	120	4.7244	260	10.2362	55	2.1654	-	-	-	.100	32.3	2400	36000	38000
6326	130	5.1181	280	11.0236	58	2.2835	-	-	-	.12	40.1	2200	39000	43000
6328	140	5.5118	300	11.8110	62	2.4409	-	-	-	.12	48.1	2000	44000	50000
6330	150	5.9055	320	12.5984	65	2.5590	-	-	-	.12	57.8	1900	49000	60000

ANEXO IV

MÁQUINA ACCIONADA EJEMPLOS	MOTOR ELÉCTRICO	MOTORES DIESEL Y DE GASOLINA	
		4 A 6 CILINDROS	1 A 3 CILINDROS
Funcionamiento uniforme, con masas pequeñas a acelerar. Bombas hidráulicas y centrifugas, generadores eléctricos, ventiladores, máquinas herramientas, agitadores para líquidos, cintas transportadoras.	1.0-1.2	1.5	2.0
Funcionamiento uniforme, con masas medianas a acelerar. Máquinas para el plegado de chapa metálica, máquinas para el trabajo de madera, molinos, máquinas textiles, mezcladoras.	1.5	1.8	2.5
Con masas medianas a acelerar y un funcionamiento irregular. Hornos rotativos, máquinas de imprimir y de colorear, alternadores, trituradoras, devanadoras, máquinas de hilar, bombas para líquidos viscosos, transportadores por cadenas.	1.8	2.0	2.8
Con masas medianas a acelerar, funcionamiento irregular y choques. Mezcladoras para hormigón, martillos mecánicos, vagones de tracción por cable, molinos papeleros, bombas de hélice, devanadoras de cable, laminadoras para caucho.	2.0	2.5	3.0
Masas muy grandes a acelerar, funcionamiento irregular y fuertes choques. Excavadoras, molinos de martillos, bombas de embolo con volante, prensas, máquinas rotativas para perforaciones, cizallas, prensas de forja, prensas de estampación.	2.2	2.8	3.5
Masas muy grandes a acelerar, funcionamiento irregular y choques muy fuertes. Compresores y bombas de embolo sin volante, laminadoras pesadas, máquinas para la soldadura, prensas para ladrillos, machacadoras de piedras.	2.5	3.0	3.8

Periodo de Funcionamiento horas/día			
Mas de hasta	2	2	12
		12	24
Factor F2	1	1.15	1.3

Arranques por hora					
Mas de hasta	10	10	40	120	200
		40	120	200	
Cambios por hora	1	1.25	1.75	2.5	3

RENOLD HiTEC Couplings

Datos Técnicos del PM - Bloques Especiales Redondos PM 12 - PM 600

TAMAÑO ACOPLAMIENTO	12	18	27	40	60	90	130	180	270	400	600
kW / rpm	1.2 5	1.89	2.83	4.19	6.28	9.43	13.6 2	18.8 6	28. 29	41.9 1	62. 86
PAR NOMINAL TKN (kNm)	3.2	4.8	7.2	10.6 7	15.9 9	24.0	34.6 7	48.0	72. 0	106. 67	15 9.9 9
PAR MÁXIMO TKmax (kNm)	12. 0	18.0	27.0	40.0	60.0	90.0	130. 0	180. 0	270 .0	400. 0	60 0.0
PAR VIBRATORIO TKW (kNm) (2)	1.0	1.5	2.25	3.33 4	5.0	7.5	10.8 33	15.0	22. 5	29.0	42. 75
CALOR DISIPADO PERMISIBLE A TEMP. AMBIENTE 30°C PKW (W)	130	150	180	220	260	300	340	375	440	490	56 5
VELOCIDAD MÁXIMA (rpm)	345 0	2975	265 0	238 0	205 0	183 0	1600	146 0	126 0	109 0	97 5

TAMAÑO ACOPLAMIENTO	0.4	0.7	1.3	3	6	8	12	18	27	40	60	90	130
kW / rpm	0.0 45	0.0 7	0.1 4	0.3 2	0.6 3	0.8 4	1.2 5	1.8 9	2.8 3	4.1 9	6.2 8	9.4 3	13 .6 2
PAR MÁXIMO TKmax (kNm)	0.4 3	0.6 7	1.3	3.0	6.0	8.0	12. 0	18. 0	27. 0	40. 0	60. 0	90. 0	13 0. 0
PAR VIBRATORIO TKW (kNm) (2)	0.0 54	0.0 84	0.1 63	0.3 75	0.7 5	1.0	1.5	2.2 5	3.3 75	5.0	7.5	11. 25	16 .2 5
CALOR DISIPADO PERMISIBLE A	26 6	32 2	365	45 8	56 4	56 2	67 0	79 8	870	10 18	11 59	12 09	13 69

Acoplamiento PM Tabla de Dimensiones Tipo PM-MM

TAMAÑO DEL ACOPLAMIENTO		0.4	0.7	1.3	3	6	12	18	27	40				
TIPO DE MOTOR		60	60	60	60	61	61	614	61	61	62	62	62	
		2	3	4	6	8	0	2	6	8	0	2	4	
cv		7	10	15	25	35	50	75	100	15	20	27	37	50
		80	72	65	57	52	50	47	460	45	41	39	36	34
rpm		0	5	0	5	5	0	5	0	0	0	0	0	0
		16	18	18	21	26	26	33	338	39	44	44	44	49
A		1.9	7.3	7.3	5.9	0.3	0	8	2	0	0	0	0	
		15	17	17	19	21	23	28	281	31	33	33	39	46
B		3	2	2	6	9	7	1.5	.5	8	6.5	6.5	2.5	6
		1	2	2	2	3	3	3.5	3.5	4	4.5	4.5	4.5	5
C		1	2	2	2	3	3	3.5	3.5	4	4.5	4.5	4.5	5
		51	54	54	64	70	86	10	109	12	14	14	14	16
D1		14	17	17	19	23	24	31	312	36	40	40	40	45
		6	1.4	1.4	6.8	5	0	2	0	7	7	7	7	8
F		13	15	15	18	21	22	28	280	32	36	36	36	41
		3	7	7	1	4.3	2	0	0	7	7	7	7	8
G		13.	15.	15.	18.	18.	18.	18.	18.	21	21	21	21	21
		5	3	3	7	9	5	5	5	21	21	21	21	21
H		10	12	12	13	17	17	19	216	24	25	30	30	30
		2	1	1	3	1	8	0	1	4	5	5	5	5
K		83	95	95	14	14	17	22	222	28	28	28	28	28
		6	6	6	6	6	1	2	6	6	6	6	6	6
K1		44.	50.	50.	63.	76.	82.	92.	107	11	12	14	15	17
		45	80	80	50	20	55	07	.95	7.4	7.0	9.2	8.7	7.
L		76.	88.	88.	10	12	12	15	158	18	20	22	22	22
		2	9	9	1.6	3.8	7	8.7	.7	1	3.2	8.6	8.6	8.
L1		70	83	83	95	11	11	12	124	13	14	16	17	23
		1	1	1	1	1	1	4	7	9	8	8	8	2
M		31	33	33	35	35	37	45	45	52	40	51	67	67
		10	11	11	13	14	14	16	169	18	18	21	24	29
N		1	6	6	0	6	8	9	9	9	9	9	5	9
		20	25	25	33	33	40	48	483	58	58	58	58	58
P		3	4	4	0	0	6	3	4	4	4	4	4	4
		36	39	39	46	60	81	10	102	11	13	13	15	15
V		3	4	4	0	0	6	3	8	4	4	4	2.7	7
		22	27	27	38	49	50	72	72	80	92	92	92	10
W		41	51	51	64	73	85	10	109	12	14	14	14	16
		3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	3	3	2
MÍN. Y MÁX. Y Z		3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
		3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5

0.4 - 60

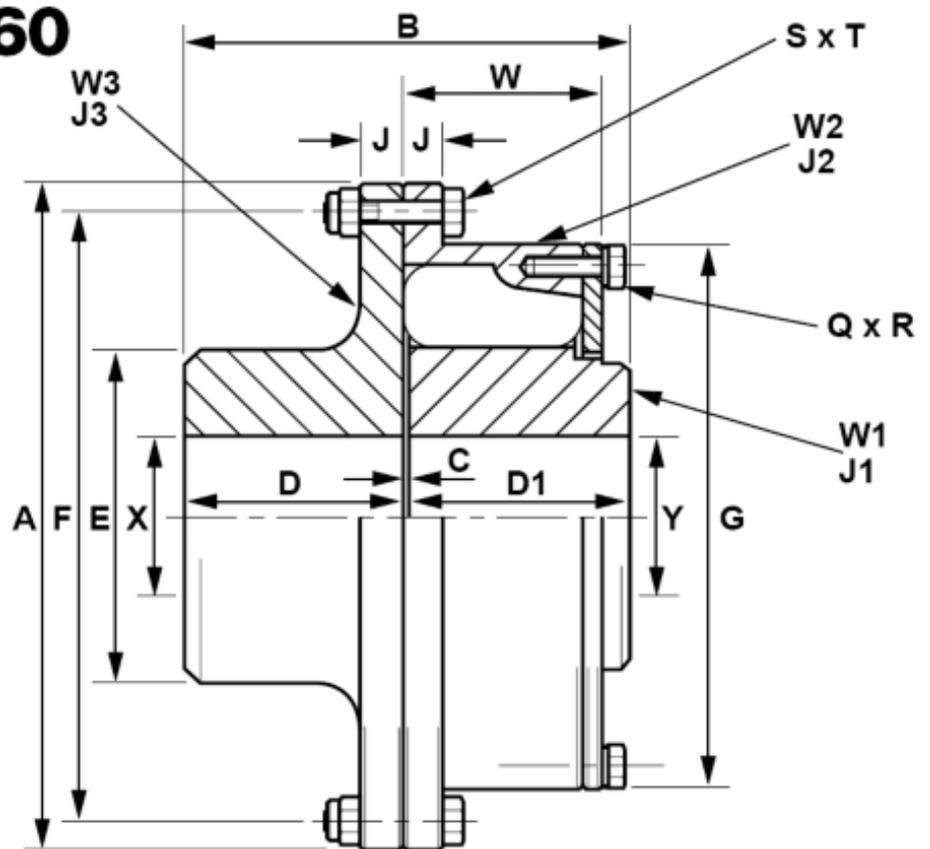


fig. No. 35, dimensionamiento del acoplamiento PM

CONCLUSIONES

1. Durante el diseño y la investigación para la realización del presente trabajo se desarrolló de manera concisa y ordenada el estudio de los diferentes equipos que existen en la industria para la molienda encontrando al molino de bolas como la mejor opción para la fabricación de 15,674 Toneladas de mineral por año calculando las dimensiones del molino, el grado de llenado, el consumo de energía eléctrica y las capacidades de producción que tendrá.
2. También se redujo de manera significativa cualquier desgaste ocasionado durante la transmisión de movimiento, tomando en consideración diferentes aspectos básicos en el cálculo de engranes, ejes, rodamientos, acoplamientos, selección del motor eléctrico y el reductor de velocidad. Poniendo en práctica los conocimientos adquiridos y detallando los procedimientos de cálculo.

RECOMENDACIONES

1. Debemos seguir investigando sobre los diseños de los equipos que son empleados en la planta concentradora, ya que con ello se puede empezar a fabricar nuestros propios equipos.
2. **Se debe realizar prácticas de diseño de plantas en las aulas universitarias, y no continuar con el dictado de clases teóricamente.**

BIBLIOGRAFÍA

1. Avallone, Eugene A., Baumeister III, Theodore, (1997). Manual del ingeniero mecánico. Tomo I. novena edición. Colombia. Mc Graw hill.
2. Juárez, Alejandro, (2005). Tesis: Propuesta para eficientar la utilización del equipo en la fabricación portland blanco. México. Instituto Politécnico Nacional.
3. Norton, Robert L., (1999). Diseño de máquinas. Primera edición. México. Prentice hall.
4. Perry, Robert H., Green, Don W., Maloney, James O., (1992). Manual del ingeniero químico. Tomo II. Sexta edición. México.
5. Riley, William F., Sturges, Leroy D., Morris, Don H., (1997). Mecánica de materiales. México. Limusa, Wiley.
6. Smith, Edward H., (1998). Manual del ingeniero mecánico. Tomo I, II y III. Primera edición. México. Prentice Hall.

HEMEROTECA:

1. Plantas trituradoras, <http://www.fam.de/espanol/index.html>, (2008).
2. Catálogo de motores eléctricos SIEMENS, (2007)
3. Catálogo de acoplamientos, (2008).
4. Catálogo de reductores de velocidad RAISA, (2007).
5. Máquinas y equipos para la minería, (2007).
6. Trituradores, (2008).