

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Rediseño del Molino de Bolas MB-800 para la molienda de Cemento LC³.

Autor: Gilber Amner Pérez Valero.

Tutor: Dr. Ricardo Alfonso Blanco.

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.	4
1.1- Materiales aglomerantes.	4
1.2- Características generales del Cemento.....	4
1.3- Características del Cemento LC3.....	5
1.4-Proceso de molienda.....	5
1.4.1- Tipos de Molienda.	6
1.4.2- Principales máquinas para molienda.....	7
1.5- Características generales de los molinos.	7
1.5.1- Partes principales de un molino.	7
1.5.2- Movimiento de la carga en molinos.	8
1.6- Principales tipos de molinos de bolas en cuanto al funcionamiento.	9
1.7- Mecánica del medio de trituración del molino de bolas.	10
1.8- Volumen de llenado de un molino de bolas.....	11
1.9-Eficiencia de los molinos de bolas.....	12
1.10-Velocidad crítica.	12
1.11- Placas de blindaje en los molinos de bolas.....	13
1.12- Características del molino de bolas MB-800.	14
2- CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS PARÁMETROS DE MOLTURABILIDAD DEL MOLINO DE BOLAS PARA CEMENTO LC ³	16
2.1-Dimensiones del tambor del molino.....	16
2.1.1-Espesor de la chapa del tambor del molino.....	17
2.2-Velocidad crítica de rotación.	18

2.2.1-Cálculo de la velocidad del molino.	18
2.3-Cálculo de la capacidad del molino.	19
2.3.1-Coeficiente de llenado.	20
2.4-Cálculo del tamaño de las bolas de molturación.	21
2.5-Productividad del molino de bolas.	24
2.6-Potencia.	24
2.7- Rediseño del tambor del molino.	27
3-DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DEL MOLINO DE BOLAS.....	28
3.1-Selección del motorreductor.....	28
3.1.1-Selección del motor	28
3.1.2-Selección del motorreductor inicial.....	28
3.1.3- Forma constructiva, cantidad de lubricante y dimensiones del reductor.	28
3.1.4-Selección final de motorreductor.	30
3.1.5- Dimensiones del motorreductor.....	30
3.1.6-Dimensiones del lado de entrada de los reductores.....	32
3.1.7- Dimensiones del extremo del árbol de salida del reductor.	33
3.2-Selección de los soportes del tambor del molino.	33
3.2.1-Dimensiones de los rodamientos de bolas del soporte del tambor.	34
3.2.2-Tiempo de vida útil de los rodamientos del soporte del tambor.....	35
CONCLUSIONES	40
ANEXOS.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	45

RESUMEN

En la presente investigación se realiza el rediseño del molino de bolas MB-800 destinado a la fabricación de un cemento ternario conocido como LC³ con el objetivo de aumentar la producción sin acrecentar significativamente los costos de fabricación de la maquinaria. En el primer capítulo de este documento se realiza una investigación teórica acerca de los materiales aglomerantes y los molinos de bolas, con los cuales se efectúa una parte importante del proceso de producción de estos materiales. En el segundo capítulo se exponen modificaciones en cuanto a los parámetros de molturabilidad y capacidad del molino de bolas, mediante las cuales se va a reflejar el aumento de la productividad de cemento LC³. Por último, se diseña el sistema de transmisión para obtener como resultado un motorreductor que satisfaga las necesidades de diseño en cuanto a la potencia necesaria y las revoluciones de trabajo del molino.

ABSTRACT

In the present investigation the redesign of the MB-800 ball mill destined to the manufacture of a ternary cement known as LC³ is carried out with the aim of increasing the production without significantly increasing the manufacturing costs of the machinery. In the first chapter of this document a theoretical investigation is made about the binder materials and the ball mills, with which an important part of the production process of these materials is carried out. In the second chapter, modifications are presented regarding the crushing parameters and capacity of the ball mill, by means of which the LC³ cement productivity increase will be reflected. Finally, the transmission system is designed to obtain as a result a gearmotor that satisfies the design needs in terms of the necessary power and the working revolutions of the mill.

INTRODUCCIÓN

A medida que la economía cubana cambia, la demanda de materiales de la construcción crece de forma extremadamente rápida: la solicitud de cemento se espera crezca más de un 70% en los próximos tres años. Cuba no dispone en la actualidad de la capacidad productiva propia para mantener este crecimiento. Adicionalmente, la producción de cemento necesita un uso intensivo de recursos y genera emisiones de carbono. Uno de los retos de Cuba es encontrar formas de producir más cemento con Clinker que hoy día se produce en el país, para abastecer la demanda con un bajo impacto ambiental. (Pérez Toledo, 2017)

El proceso de fabricación del cemento de manera general se puede realizar mediante una secuencia de procesos térmicos y químicos en los altos hornos, que alcanzan temperaturas de 1450 grados Celsius, ocurre la descomposición de materiales como la caliza, reaccionando con otros materiales de cantera tales como la arcilla, el mineral de hierro y la arena, la fusión parcial de estos componentes da origen a la formación de nódulos duros, redondeados denominados Clinker.

Después del enfriamiento, el Clinker se muele junto con, aproximadamente 5 % de yeso hasta una finura tipo harina en grandes molinos de bolas de forma tubular obteniendo el producto final: Cemento Portland. (Montano Zaldívar, 2017)

Por la calidad del cemento se entiende el grupo de propiedades que caracterizan el cemento en su uso final como aglomerante hidráulico en hormigones y morteros, utilizados para actividades de construcción. Dichas propiedades son importantes para la fabricación, la ejecución y la vida útil de los productos de hormigón para los cuales el cemento es utilizado. Los requisitos de calidad del cemento vienen de los usuarios y los aspectos importantes pueden variar mucho, dependientemente del hormigón fabricado y el método de producción utilizado.

Para la tarea de fabricar un cemento que cumple con los requisitos de las normas y de los usuarios, los fabricantes de cementos disponen de una variedad de materiales, equipos de producción y parámetros del proceso. Cuanto mejor entiendan los fabricantes la relación básica entre dichos factores y las propiedades con respecto al uso final del cemento, mejor podrán controlar las propiedades, por ejemplo, mantenerlas al nivel deseado y reducir la variación alrededor de ese nivel al mínimo posible. (PropiedadesCEMENTOS.pdf)

En el proceso de producción del cemento y otros aglomerantes se realiza la operación de molienda, la cual está conformada por varias etapas:

- La primera etapa consiste en fraccionar sólidos de gran tamaño. Para ello se utilizan los trituradores o molinos primarios. Los más utilizados son el de martillos, muy común en la industria cementera y el de mandíbulas.

- La segunda etapa sirve para reducir el tamaño con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas.

El molino de bolas lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto. Cuando este gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino. Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler, además de un buen mezclado del material. De esta manera la molienda es uniforme.

En las industrias nacionales se han tenido varias experiencias en la fabricación de las máquinas para producir materiales de la construcción y en específico aglomerantes para mezclas y concreto. En este proceso se pueden utilizar varias máquinas como trituradoras y molinos, en dependencia del producto final que se desee obtener. Uno de estos ejemplos puede ser el molino de bolas MB-600 con una productividad de 1T/día y el molino de bolas MB-800. El molino de bolas MB-800 ha sido el de mayor eficiencia en cuanto a la calidad del trabajo y la productividad, pero esta máquina aún puede ser mejorada con el objetivo de aumentar su producción y el costo de sus arreglos puede ser relativamente bajo.

Planteamiento inicial: Necesidad de realizar el proceso de molienda, de materiales aglutinantes, con calidad y mayor productividad para así disminuir las necesidades de materiales de construcción de nuestro país.

Por lo anterior, el **Problema Científico** es:

Será posible, en el marco de la producción local de materiales de construcción, mejorar la eficiencia y calidad del proceso de molienda del cemento LC³ en el molino de bolas MB-800, sin aumentar significativamente los costos de fabricación de la maquinaria.

Por lo que se propone como **Objetivo General**:

Rediseñar el molino de bolas MB-800 sin aumentar significativamente los costos de fabricación de la maquinaria, de manera que realice el proceso de molienda del cemento LC³ con mejor eficiencia y calidad

Por lo tanto, se proponen los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Definir los cambios a realizar en el molino MB-800 para mejorar la eficiencia del equipo.
2. Según los cambios definidos (objetivo 1), Rediseñar los componentes necesarios del molino de bolas MB-800.
3. Realizar los cálculos que garanticen el buen funcionamiento del molino con los cambios realizados en el rediseño de este.

Hipótesis:

Si se rediseña el molino de bolas MB-800, entonces es posible mejorar la eficiencia y calidad del proceso de molienda del cemento LC³ sin aumentar significativamente los costos de fabricación de la maquinaria.

Justificación:

La necesidad de este trabajo se justifica, ya que como se mencionó anteriormente los molinos de bolas poseen gran utilidad y ventajas en la fabricación de productos de la construcción en las industrias de nuestro país.

La investigación tiene una significación teórica, práctica. La teórica está fundamentada en la revisión bibliográfica actualizada y toma de posición sobre los fundamentos relacionados con la molienda, tipos de molino, características de los molinos de bolas, además de que con la investigación se contribuye a la formación de ingenieros mecánicos.

Posee un valor práctico que se logrará rediseñar un molino de bolas que permita una molienda con mayor eficiencia y calidad.

Viabilidad del estudio:

Esta investigación es posible realizarla ya que se cuenta con los recursos necesarios para rediseñar un molino de bolas: Bibliografía actualizada, planos en formato digital de la versión inicial del diseño del molino a estudiar, computadora, software profesional, posibilidad de estudiar al molino en etapa de trabajo y entrevistas a usuarios del molino

Consecuencias:

Con el rediseño de un molino de bolas, se corrigen las dificultades existentes en el diseño actual y se logra rediseñar un molino de bolas que realice una molienda con mayor eficiencia y calidad.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

1.1- Materiales aglomerantes.

Los aglomerantes son materiales que en estado pastoso y con consistencia variable tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, son capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos físicos hasta alcanzar resistencias mecánicas considerables. De forma general existen diferentes tipos de aglomerantes como son los aglomerantes naturales que proceden de una roca natural sin adición alguna, como el yeso, la cal y los cementos naturales y los aglomerantes artificiales que se obtienen de la calcinación de mezclas de piedras de composición conocida y cuidadosamente dosificadas. Como es el caso de los cementos artificiales. Hay que hacer otra distinción entre aglomerantes aéreos y aglomerantes hidráulicos, los aéreos son los que solo fraguan y se endurecen en contacto con el aire y no contienen arcilla y los hidráulicos son aquellos que fraguan lo mismo en el aire que en agua y contienen arcilla en cantidades relativamente importantes. Entre los aglomerantes más usados están los primarios como son el yeso, la cal y el cemento y los secundarios que mezclados con los áridos, arenas y gravas, forman los componentes más utilizados, los morteros y el hormigón. (Aguilar Contreras, 2015)

1.2- Características generales del Cemento.

El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. El producto resultante de la molienda de estas rocas es llamada Clinker y se convierte en cemento cuando se le agrega una pequeña cantidad de yeso para que adquiera la propiedad de fraguar al añadirle agua y endurecerse posteriormente. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétrea, denominada hormigón o concreto.

Este está formado por Clinker (80 %), caliza (15 %) y yeso (5 %). Al ser el Clinker el principal componente del cemento es el que determina sus propiedades básicas que son: resistencia, calor de hidratación, estabilidad de volumen y durabilidad. Estas propiedades se pueden variar de acuerdo con la necesidad del usuario, para ello se afecta la composición mineralógica de los componentes del Clinker. (Abreu Cerdá, 2017)

En la producción del cemento la fracción granulométrica de 3-30 μ m es decisiva para el desarrollo de las resistencias mecánicas del cemento. La fracción menor que 3 μ m solo contribuye a las resistencias iniciales, esa fracción se hidrata rápidamente y después de un día suministra las resistencias más altas a compresión y a flexotracción. La fracción por encima de 60 μ m se hidrata muy lentamente y solo representa un papel secundario en la resistencia del cemento. (H. Duda, 1997)

Propiedades generales del cemento

- Buena resistencia al ataque químico.
- Resistencia a temperaturas elevadas.

- Resistencia inicial elevada que disminuye con el tiempo.
- Se ha de evitar el uso de armaduras. Con el tiempo aumenta la porosidad.
- Uso apropiado para bajas temperaturas por ser muy exotérmico.

1.3- Características del Cemento LC3.

El cemento de bajo carbono (LC³) es una nueva formulación propuesta en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM) y en colaboración con un grupo de investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), en Suiza. Este nuevo aglomerante es un cemento ternario, con un considerable potencial ahorro de emisiones de CO² (hasta 50%), al mismo tiempo que muestra propiedades similares al cemento Portland. Esto se logra mediante la sustitución parcial del Clinker por una combinación sinérgica de arcilla calcinada y piedra caliza, esta calcinación ocurre a temperaturas más bajas que la requerida para la obtención del Clinker lo que conlleva a ahorros de combustible. La novedad y el potencial del LC³ residen en el efecto sinérgico de arcillas calcinadas y piedra caliza en términos de resistencia a las proporciones de mezcla específicas. (Arbona Armas, 2017)

El cemento ecológico resulta de gran utilidad en aplicaciones que no lleven refuerzo, es decir, en la producción de bloques de hormigón, tejas de techo, y en general en todos los trabajos de terminación, además de ser muy útil a la industria petrolera por sus propiedades refractarias. (Arbona Armas, 2017)

1.4-Proceso de molienda.

La molienda es una operación que permite la reducción del tamaño de la materia hasta tener la granulometría deseada, mediante diversas máquinas que trabajan por choques, aplastamiento o desgaste. En esta operación de molienda, es donde se realiza la liberación de los minerales valiosos y pueden ser separados de sus acompañantes.

- ❖ Por lo general, la molienda está precedida de una sección de trituración y, por lo tanto, la granulometría de los minerales que entran a la sección de molienda es casi uniforme. Los tamaños pueden variar de 20 mm a unos 5 mm. (Tintaya, 2012)

Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son: (ver Figura 1.1 compresión(a), cortado o penetración(b), frotamiento de cizalla(c) e impacto(d)).

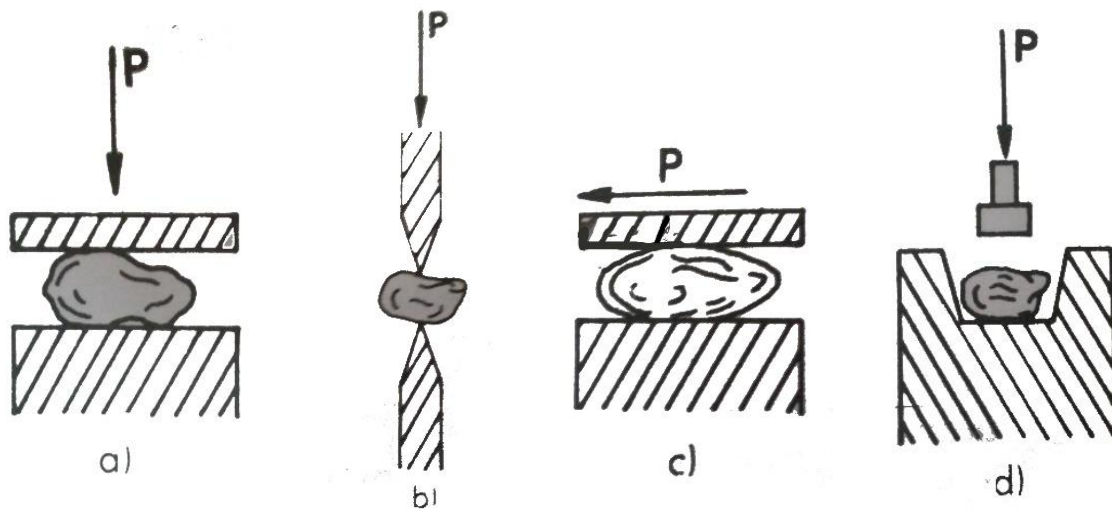


Figura 1.1: Métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda.

Fuente: Shubin, V. S. and C. Pedre, 1977.

1.4.1- Tipos de Molienda.

La molienda se puede dar de 2 tipos:

- Molienda en seco
- Molienda en húmedo (la más usual)

1. Molienda en seco, se caracteriza por:

- ❖ Obtener material triturado más fino y en forma de polvo seco.
- ❖ Produce un menor desgaste de los revestimientos y medios de molienda.
- ❖ Casi siempre se emplea en casos como la molienda de minerales solubles, cemento, sal y otros minerales industriales empleados en la industria química.

2. Molienda en húmedo, se caracteriza por:

- ❖ Tiene menor consumo de energía por tonelada de mineral tratada, haciendo que la molienda sea más eficiente.
- ❖ Logra una mejor capacidad del equipo.
- ❖ Minimiza problemas del polvo y ruido, mejorando las condiciones ambientales de trabajo.

- ❖ Posibilita el uso de técnicas simples de manejo y transporte de la corriente de interés en equipos como bombas, cañerías, canaletas.
- ❖ Se emplea en todos los casos en que el material triturado se somete ulteriormente a la elaboración en forma de suspensión. (Hinojosa Quispe, 2017)

1.4.2- Principales máquinas para molienda.

1. Molinos

- Molino de Martillos.
- Molino de Rodillos con compresión.
- Molino de Tazón.
- Molino de Rodillos.
- Molino de Fricción.
- Molinos Revolvedores.
- Molinos de Barras.
- Molinos de Bolas.
- Molinos de Tubos.

2. Molinos Ultra finos

- Molinos de Martillos con clasificaron interna.
- Molinos de Flujo Energético.
- Molinos agitadores. (Alcántara Valladares, 2008)

1.5- Características generales de los molinos.

Estructuralmente cada tipo de molino consiste de un casco cilíndrico con revestimientos reemplazables y una carga de medios de molienda. El tambor es soportado en muñones fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y, en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro. La longitud del molino junto con el diámetro determina el volumen y por consiguiente la capacidad del molino. (Alcántara Valladares, 2008)

1.5.1- Partes principales de un molino.

Casco: El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada, 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 bridas de acero generalmente soldadas a los extremos de las placas del casco, los cuales tienen perforaciones para apernarse a la cabeza. (Alcántara Valladares, 2008)

Extremos: Los extremos del molino o cabezas de los muñones pueden ser de hierro fundido gris o nodular para diámetros menores de 1 m. Cabezas más grandes se construyen de acero fundido, el cual es relativamente liviano y puede soldarse. Las cabezas son nervadas para reforzarlas. (Alcántara Valladares, 2008)

Revestimientos: Las caras de trabajo internas del molino consisten de revestimientos reemplazables que deben soportar impactos, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga. Los extremos de los molinos de barras tienen revestimientos planos de forma ligeramente cónica para inducir el centrado y acción rectilínea de las barras. Generalmente están hechas de acero al manganeso o acero al cromo-molibdeno, con alta resistencia al impacto, también los hay de goma.

Los extremos de los molinos de bolas generalmente tienen nervaduras para levantar la carga con la rotación de molino. Ellos impiden el deslizamiento excesivo y aumentan la vida del revestimiento. Generalmente están hechos de fierro fundido blanco aleado con níquel, Ni-duro y otros materiales resistentes a la abrasión como goma. Los revestimientos de los muñones son diseñados para cada aplicación y pueden ser cónicos, planos y con espirales de avance o retardo. (Alcántara Valladares, 2008)

1.5.2- Movimiento de la carga en molinos.

Una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda grandes y pesados con relación a las partículas de mena, pero pequeñas con relación al volumen del molino y 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.
- c) Caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el pie de 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 tienen que rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva. La caída en cascada produce una molienda más fina con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el “pie” de carga. La caída en catarata produce conminución por impacto y un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento.

1.6- Principales tipos de molinos de bolas en cuanto al funcionamiento.

Según Shubin y Pedre (1977), entre los principales tipos de molinos se encuentran:

1. *Molino de acción periódica* (ver Figura 1.2): La carga de los cuerpos trituradores y del material a triturar, así como la descarga del molino, se efectúa periódicamente a través del registro 4 de la Figura 1.2. Estos molinos se emplean en las instalaciones trituradoras de poca productividad, en los trabajos auxiliares o cuando conjuntamente con la trituración en el tambor se realizan otros procesos y es necesario que el material permanezca algún tiempo en la zona de trituración.

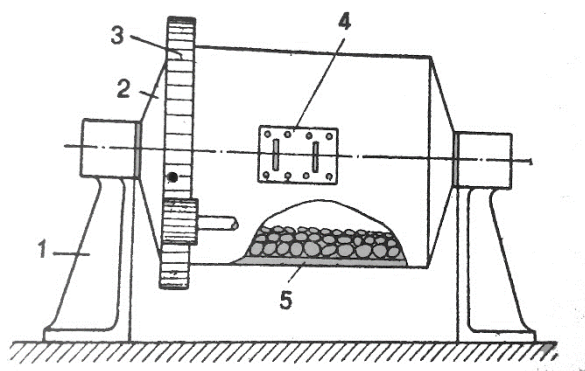


Figura 1.2: Molino de acción periódica.

Fuente: Shubin, V. S. and C. Pedre, (1977).

2. *Molino de una sola cámara de acción continua* (ver Figura 1.3): Son molinos con alimentación de materia prima y la salida del material triturado a través de los muñones huecos del tambor, 1 y 6 de la Figura 1.3. La salida del material por un flujo de líquido se efectúa en la trituración húmeda. El líquido pasa al molino conjuntamente con el material a triturar y al pasar desde el muñón de entrada al muñón de salida se lleva las partículas finas. La pulpa obtenida, después que se han extraído de ellas las partículas grandes,

se dirige o a una elaboración ulterior por ejemplo la flotación, o a los sedimentadores para obtener la fase sólida. En todos los métodos de salida del material triturado del tambor, dicho material contiene además de las fracciones principales, partículas más grandes. Para dividir el material triturado en fracciones, los molinos deben trabajar en un ciclo cerrado con dispositivos clasificadores, cribas, separadores de aire o clasificadores hidráulicos.

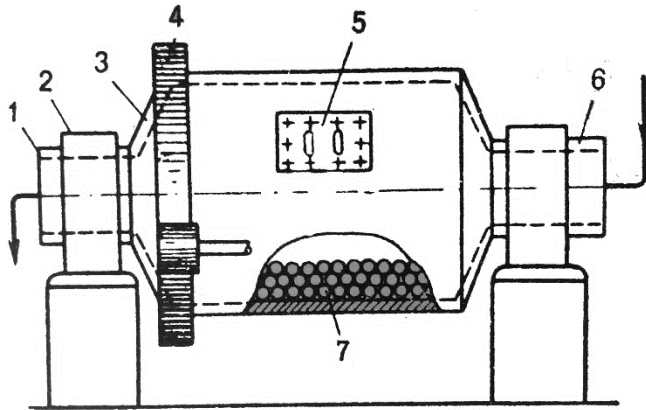


Figura 1.3: Molino de una sola cámara de acción continua.

Fuente: Shubin, V. S. and C. Pedre, (1977).

3. *Molinos de cámaras múltiples de acción continua* (ver Figura 1.4): estos molinos se denominan “tubulares” ya que la relación del diámetro del tambor con su longitud es desde $1/2$ hasta $1/5$ y más y el molino tiene forma de tubo. La carga y la descarga de los cuerpos trituradores se efectúa a través de los registros 4 de la Figura 1.4, que se encuentran en cada cámara. En los molinos tubulares de cámaras múltiples se obtiene una producción con el grosor necesario sin empleo de clasificadores. La dimensión de las partículas del material triturado se determina por el tiempo de permanencia del material en el triturador (Shubin, V. S. and C. Pedre, 1977).

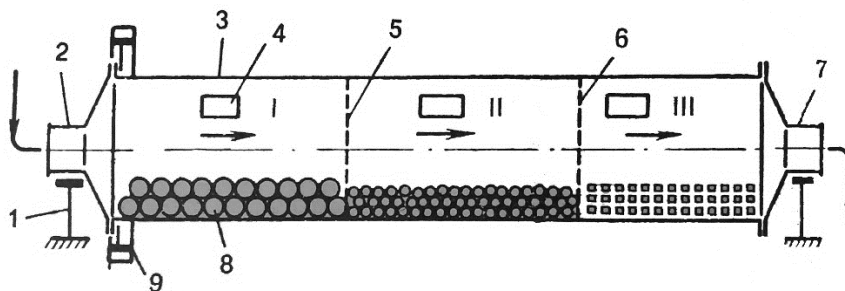


Figura 1.4: Molinos de cámaras múltiples de acción continua.

Fuente: Shubin, V. S. and C. Pedre, (1977).

1.7- Mecánica del medio de trituración del molino de bolas.

El régimen de trabajo del molino de bolas se determina por la frecuencia de rotación del tambor. A frecuencia baja de rotación del molino toda la carga de bolas da la vuelta en cierto ángulo

para el lado de rotación y con una frecuencia de rotación permanente queda en la misma posición (ver Figura 1.5). Las bolas circulan constantemente subiendo por trayectorias circulares concéntricas y bajando por capas paralelas en formas de cascada. Tal régimen de trabajo del molino se llama **régimen de cascada**. El desmenuzamiento del material en el régimen de cascada se efectúa principalmente por su aplastamiento y por el frote de las bolas que ruedan. Cuando al final las bolas suben hasta una altura superior dada que se determina por la frecuencia de rotación del molino, salen de las trayectorias circulares y como cuerpos lanzados en ángulos con respecto al horizonte, van a caer de nuevo a las trayectorias circulares en forma de catarata. Tal régimen de trabajo del molino se llama **régimen de catarata** (ver Figura 1.6). El desmenuzamiento del material bajo el régimen de catarata se efectúa principalmente por el golpe de las bolas que caen y parcialmente por el desgaste.

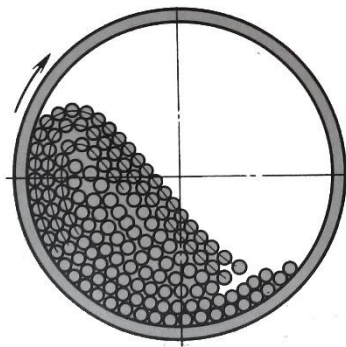


Figura 1.5: Contorno de la carga de bolas en el régimen de trabajo de cascada del molino.
Fuente: S.E. Andreiev (1980).

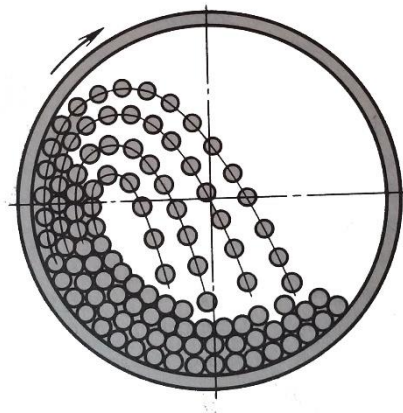


Figura 1.6: Contorno de la carga de bolas en el régimen de catarata de trabajo del molino.
Fuente: S.E. Andreiev (1980).

1.8- Volumen de llenado de un molino de bolas.

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza del mineral y tonelaje que puede tratar el molino para un mismo grado de molienda. Por ejemplo, un aumento del tonelaje a tratar involucra un menor tiempo de residencia, lo que se compensa con una mayor

carga de bolas, a fin de aumentar la probabilidad de contacto entre bolas y mineral. Lo mismo sucede frente a un mineral que presenta una mayor dureza. (Alcántara Valladares, 2008)

1.9-Eficiencia de los molinos de bolas.

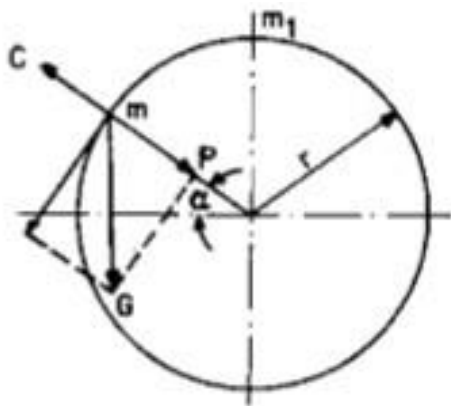
Casi el 85% del total de la energía invertida en la producción de cemento, corresponde al desmenuzamiento y a la molienda de las materias primas y del cemento; aproximadamente el 75% solo a la molienda. El nivel del grado de eficiencia de la molienda es objeto de controversia, según la definición que se adopte. De acuerdo con interpretaciones muy diversas, la energía que el molino requiere para transformarla en trabajo de desmenuzamiento queda situada entre el 2% y el 20%, el resto se distribuye en rozamiento de las partículas entre sí, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, ruido, calor, vibración, rendimientos del motor y del molino, elevación del material en el molino. (H. Duda, 1997)

Para la máxima utilización de la energía, la relación de la carga de cuerpos moledores a la de material que se ha de moler debe estar coordinada entre si y ciertamente teniendo en cuenta la finura de la molienda, esa relación ha de ser tanto mayor cuanto mayor sea la finura del material molido. Si se ha de lograr una finura que corresponda a un cemento corriente con el máximo aprovechamiento simultaneo de la energía de molienda, la relación del llenado de bolas al llenado del material a moler, ha de ser igual o mayor que 15. (H. Duda, 1997)

Respecto al rendimiento del accionamiento de los molinos por accionamiento central o bien con corona y piñón, no se dispone de pruebas evidentes de la superioridad de un tipo sobre el otro. Ambos accionamientos, para molinos que permitan compararse muestran rendimientos del 98-97%, según el tipo. Sin embargo, desde el punto de vista de los costes, está claramente demostrado que el accionamiento central para mismas dimensiones de molino es, aproximadamente, un poco más caro que el accionamiento con corona o piñón. (H. Duda, 1997)

1.10-Velocidad crítica.

La velocidad crítica del molino, es la velocidad mínima a la cual la capa exterior de medios de molienda se adhiere a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga. A esta velocidad, la fuerza centrífuga es justo balanceada por el peso de los medios de molienda. Normalmente el rango de trabajo es entre 70 y 80 % de la velocidad crítica. (Alcántara Valladares, 2008)



Donde:

G- Peso de la bola para molienda.

r- Radio interior libre del tambor.

n- Vueltas por minuto.

C- Fuerza centrífuga.

Figura 1.7: Representación gráfica de la velocidad angular crítica.

Fuente: H. Duda (1997).

1.11- Placas de blindaje en los molinos de bolas.

La forma más frecuente de desgaste de las placas de blindaje es la formación de ranuras. Para contrarrestar este fenómeno se han desarrollado diferentes formas superficiales de las placas de blindaje. La finalidad de estas diversas superficies es llevar a las bolas a un movimiento de deslizamiento y ordenar, según tal movimiento, las trayectorias de los cuerpos moledores. Como la velocidad de rotación del molino es difícil de modificar, solo queda para los problemas, en la mayoría de los casos, la posibilidad de dar forma adecuada a la superficie de las placas de blindaje, para la necesaria corrección del movimiento de los cuerpos moledores o de su caída, respectivamente. El espesor de las placas depende del diámetro del molino, así como del tamaño de los cuerpos moledores, en general, entre 30 hasta 63mm.

En general, las placas de blindaje se fijan con tornillos al interior de los molinos, es decir, cada placa de blindaje se fija a la envolvente del molino con uno, dos (antes hasta cuatro) tornillos. Para elevar la resistencia mecánica del tubo del molino y ahorrar gastos de mantenimiento para el atornillado, se han desarrollado los blindajes con aplicación muy rebajada de tornillos y, recientemente el blindaje sin tornillos. En la Figura 1.9 se represente un nuevo tipo de construcción de placas, en que solamente lleva tornillo de fijación cada segunda placa y las contiguas quedan fijadas por la presión que aquella ejerce. Con ello se ahorra, en número, la mitad de los tonillos de fijación. (H. Duda 1997).

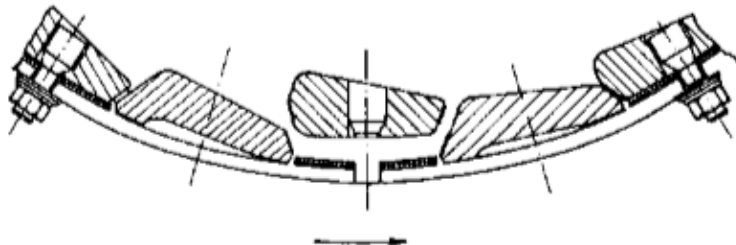


Figura 1.8: Blindaje de molino con reducido número de tornillos de fijación.

Fuente: H. Duda (1997).

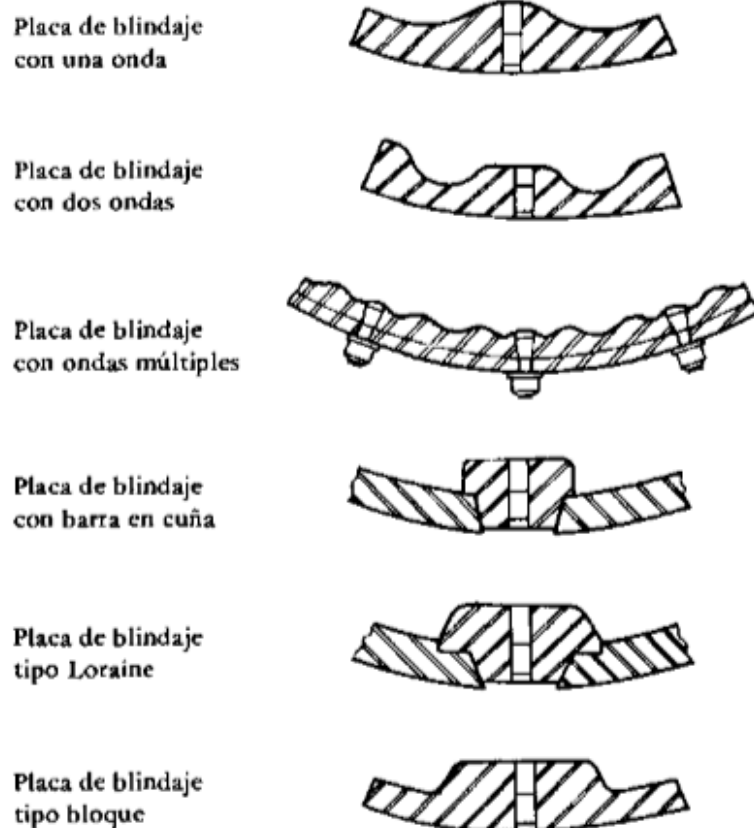


Figura 1.9: Tipos de placas de blindaje de los molinos.

Fuente: H. Duda (1997).

1.12- Características del molino de bolas MB-800.

Es un molino metálico de eje horizontal, que es girado por la acción de un motor de 220v trifásico, con potencia de 2,1-2,3 kW, en dependencia del sistema de transmisión seleccionado. El molino es capaz de convertir hasta un polvo muy fino los componentes del cemento. Este proceso se hace de forma discontinua, por lo que el llenado y vaciado del tambor se debe de hacer varias veces en una jornada, hasta completar la producción diaria. (Herrera Mesa, 2008)

Datos técnicos generales.

- Diámetro interior del tambor giratorio: 800 mm
- Longitud del tambor giratorio: 800 mm
- Carga de bolas suministrada: 560 kg
- Volumen del tambor: $V_t = 0,402 \text{ m}^3$
- Volumen de molida: $0,5 \times \text{volumen total} = 0,201 \text{ m}^3$
- Se estiman 6 batches/día

- Producción por batches = $(0,5 * 0,17) * 6 = 0,51 \text{ m}^3/\text{jornada de trabajo}$.
- Tiempo de molienda: 30 min (estimado)



Figura 1.10: Molino de bolas MB-800.

Fuente:(Herrera Mesa, 2008)

2- CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS PARÁMETROS DE MOLTURABILIDAD DEL MOLINO DE BOLAS PARA CEMENTO LC³.

El grado de utilización de la energía suministrada, teóricamente baja, ofrece más interés en el proyecto de los dispositivos de molienda, que para la explotación práctica, en la cual la energía aplicada a la molienda se puede considerar baja en relación con las ventajas del resultado tecnológico que con ella se obtiene. (H. Duda, 1997)

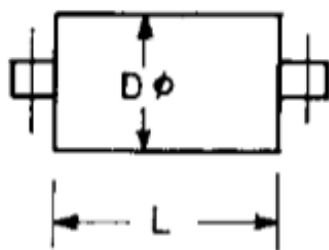
A efectos de la eficiencia del molino son de importancia las magnitudes siguientes (H. Duda, 1997):

1. Velocidad de rotación óptima correspondiente al diámetro del molino.
2. Cantidad y tipo de los cuerpos moledores.
3. Tamaño del recinto de molienda.
4. Molturabilidad del material.

Con el aumento de la dimensión de la longitud del tambor se obtiene una mayor productividad, esta se debe a que la capacidad de material a moler es mayor, y los recursos necesarios para realizar este cambio son asequibles.

2.1-Dimensiones del tambor del molino.

Según H. Duda, 1997 solamente son óptimas las dimensiones del tubo de un molino cuando tiene el peso mínimo. Para asegurar la estabilidad del molino, la exigencia del mínimo peso es consecuente con la exigencia de la mínima superficie del tubo. Una ecuación para alcanzar este requerimiento, por la cual se obtiene el mínimo de peso del molino para una determinada relación de la longitud al diámetro del mismo y para molinos de una cámara es:



$$\frac{L(\text{longitud})}{D(\text{diámetro})} = 1,5 \quad (1)$$

Figura 2.1: Dimensiones del tambor del molino.

Fuente: H. Duda (1997).

Sin embargo, para conseguir el dimensionado óptimo de los molinos, hay que interrelacionar las cifras de la longitud y el diámetro con consideraciones y exigencias técnicas acerca de la molienda.

De estas hay dos de carácter básico:

1. Si se mantiene constante la longitud del molino, la ampliación del diámetro da lugar a:

- Mayor rendimiento energético.
- Menor espacio construido por unidad de capacidad.
- Menor cantidad de partículas muy finas en el producto.
- Mayor cantidad ocasional de granos gruesos en el producto.
- Menor desgaste metálico por tonelada de producto molido.

2. Si se mantiene constante el diámetro del molino y se alarga el tubo, entonces se origina:

- Menor coste de inversión por HP instalado.
- Menor cantidad ocasional de granos sobredimensionados.
- Más granos muy finos en el producto molido.
- Menor rendimiento energético.
- La posibilidad de dividir el molino en varias cámaras.

♦ El diámetro que se desea es 0,8 m, por lo que:

Sustituyendo en (1).

$$L = 0,8 \text{ m} * 1,5$$

$$L = 1,2 \text{ m}$$

2.1.1-Espesor de la chapa del tambor del molino.

El espesor de la chapa de acero del tubo del molino va, aproximadamente, del 1/100 hasta el 1/75 del diámetro del molino, según el diámetro y la longitud del tubo de aquel. Se utilizan los siguientes espesores. (H. Duda, 1997)

♦ Diámetro del tambor: 800 mm.

$$S = 1/100 = 8 \text{ mm}$$

$$S = 1/75 = 10,67 \text{ mm}$$

- El espesor elegido para la pared del molino es 10 mm, ya que es un valor normalizado de espesores de planchas laminadas en caliente, con las siguientes características: (Multiaceros.com)
 - Calidad: ASTM A-36
 - Anchos: 1 000 y 1 500 mm.

- Largos: 3 000 y 6 000 mm.
- Espesores: Desde 1,5 hasta 12 mm.
- Límite de fluencia: mínima 2 500 [kg/cm²]
- Resistencia a la tracción: 4 080 – 5 610 [kg/cm²]
- Densidad: 7 850 kg/m³ (Placa A-36)

2.2-Velocidad crítica de rotación.

Por la velocidad crítica de rotación de un molino se toma tal frecuencia bajo la cual empiezan a centrifugar las bolas de diámetro infinitamente pequeño, situadas en la superficie interna del tambor. (H. Duda, 1997)

$$n_{cr} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

$$n_{cr} = \frac{42,3}{\sqrt{0,8 \text{ m}}}$$

$$n_{cr} = 52,9 \text{ rev/min.}$$

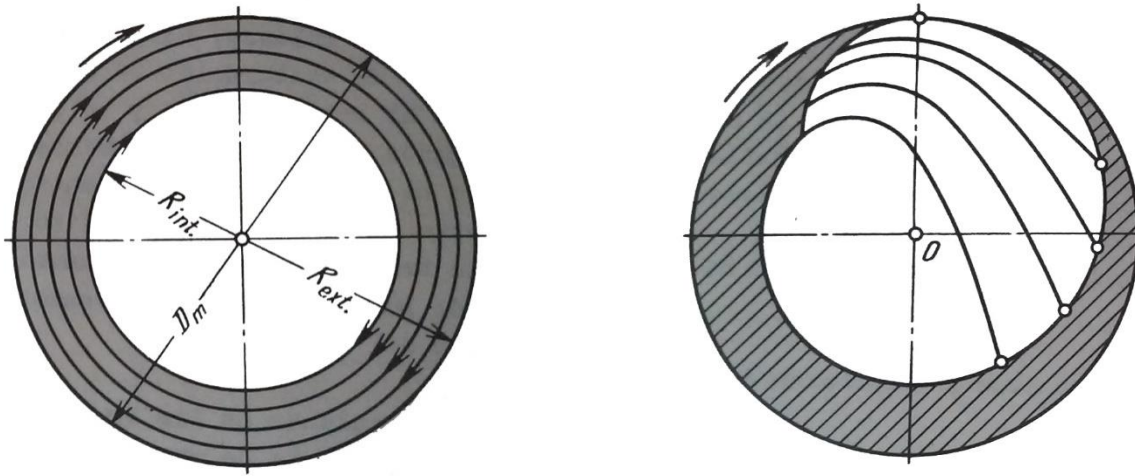


Figura 2.2: Contorno de la carga de bolas a la frecuencia de rotación crítica del tambor del molino y contorno de la carga de bolas con centrifugación completa de las bolas.

Fuente: S.E. Andreiev (1980).

2.2.1-Cálculo de la velocidad del molino.

En la Figura 2.3 se muestra el movimiento de los cuerpos moledores en los molinos de tubos para distintas velocidades y diferentes grados de llenado pequeños, solo para velocidades 60-70% de la velocidad crítica, se logra un movimiento con lanzamiento de bolas y con ello una

intensa acción demoledora por los cuerpos molturadores, mientras que, para grados de llenado altos, los cuerpos moledores realizan un trabajo de rozamiento más intenso.

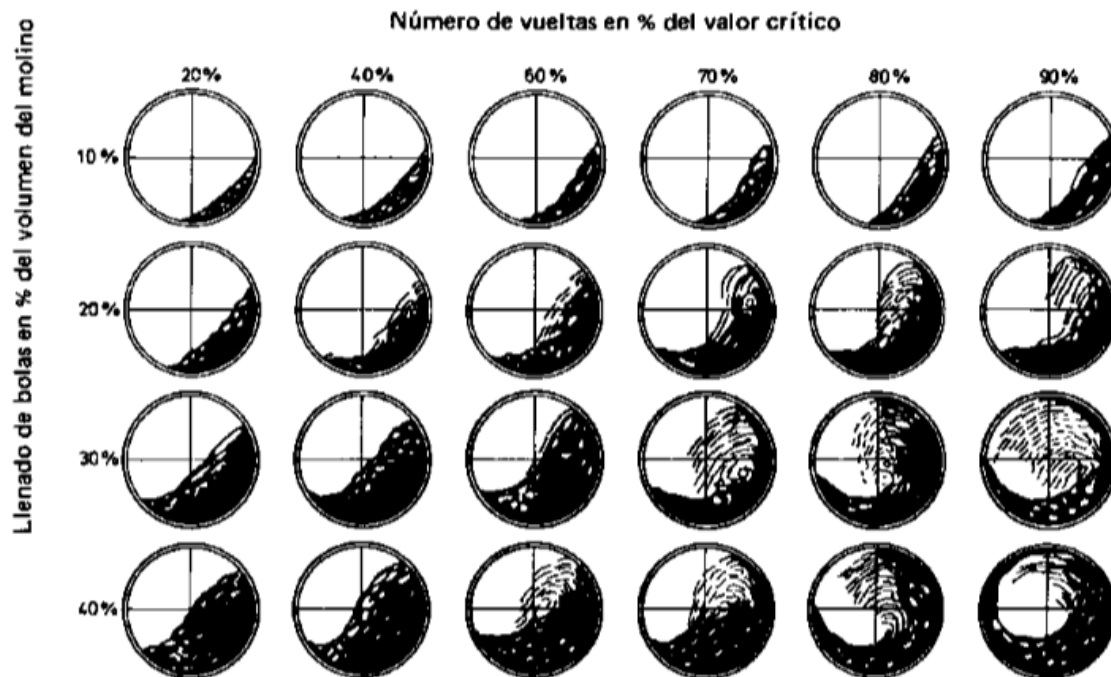


Figura 2.3: Movimiento de los cuerpos moledores en los molinos de tambor.

Fuente:(H. Duda, 1997)

- ♦ Se toma el 65 % de la velocidad crítica, con el objetivo de que el régimen de trabajo se asemeje al de cascada y se obtenga una molienda más fina.

$$\frac{n}{n_{cr}} = \frac{65\%}{100\%} \quad (3)$$

$$n = \frac{65\% \cdot n_{cr}}{100\%}$$

$$n = \frac{65\% \cdot 52,9 \text{ rev/min}}{100\%}$$

$$n = 34,4 \text{ rev/min.}$$

$$n = 34 \text{ rev/min. (Velocidad de rotación del molino.)}$$

2.3-Cálculo de la capacidad del molino.

Área de la base (**Ab**).

$$Ab = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (4)$$

$$Ab = \frac{\pi * 0,8 \text{ m}^2}{4}$$

$$Ab = 0,502 \text{ m}^2$$

Volumen del cilindro (Vc).

$$Vc = Ab * L \quad (5)$$

$$Vc = 0,502 \text{ m}^2 * 1,2 \text{ m}$$

$$Vc = 0,602 \text{ m}^3$$

2.3.1-Coeficiente de llenado.

El coeficiente de llenado de los molinos es la relación entre el volumen de las bolas y el volumen de trabajo del molino. El coeficiente de llenado en bolas varía entre el 25% y el 45%, por debajo del 25% de llenado las bolas se deslizan sobre el blindaje del molino y por encima del 45% de llenado se originan dificultades en la trayectoria de caída en los cuerpos trituradores. (Pérez Gálvez. Lima Quesada, 1998)

$$\varphi = 0,025 * (n * \sqrt{Dt} - 16) \quad (6)$$

Donde:

φ : Coeficiente de llenado.

n: Velocidad de rotación, en rpm.

Dt: Diámetro del tambor.

Sustituyendo en (6)

$$\varphi = 0,025 * (34 * \sqrt{0,8} - 16)$$

$$\varphi = 0,025 * (30,41 - 16)$$

$$\varphi = 0,025 * (14,41)$$

$$\varphi = 0,36 = 36 \%$$

- ♦ Tomando un 36% de llenado de bolas.

Volumen de bolas (**Vb**).

$$\frac{Vb}{Vc} = \frac{36\%}{100\%} \quad (7)$$

$$Vb = \frac{Vc * 36\%}{100\%}$$

$$Vb = \frac{0,602 \text{ m}^3 * 36\%}{100\%}$$

$$Vb = 0,217 \text{ m}$$

2.4-Cálculo del tamaño de las bolas de molturación.

Cálculo del tamaño máximo de las bolas de acuerdo a la fórmula de Bond (Sistema métrico).
(H. Duda, 1997)

$$B\phi\text{mm} = 20,17 * \sqrt{\frac{F}{K}} * \sqrt[3]{\frac{Wi*S}{Cs*\sqrt{D}(\text{metros})}} \quad (8)$$

Donde:

Tabla 2.1: Variables y valores para el cálculo del tamaño de las bolas de molturación.

Variables	Identificación	Unidades	Valores
B	Diámetro de la bola para la molienda.	mm	Incógnita
F	Tamaño de grano de alimentación	μm	25 000
Wi	Índice de trabajo (Caliza)	kW/Tn	10,18
Cs	Porcentaje de velocidad crítica del molino	%	65
S	Peso específico del material de la molienda.	g/cm ³	2,79
D	Diámetro libre del molino.	m	0,8
K	Constante (Cuando de utilizan bolas de acero)		-350 para molienda vía húmeda. -335 para molienda vía seca.

Tabla 2.2: Datos de la mezcla de materiales de la molienda.

Materiales	Peso específico de los materiales de la molienda. (Tn/m ³) (H. Duda, pág. 79)	Proporción (%)	Proporción (Tn/m ³)
Clinker del cemento	3,09	50	1,55
Arcilla calcinada	2,32	30	0,70
Caliza para cemento	2,68	20	0,54
Peso específico de la mezcla de materiales.			2,79 Tn/m ³

El índice de molturabilidad de Hardgrove, con índice creciente aumenta la molturabilidad, es decir el material es más fácil de moler. Este índice se puede transformar en el índice de trabajo de molienda de Bond, **Wi** mediante la fórmula siguiente:(H. Duda, 1997)

$$\mathbf{Wi} = \frac{435}{Hg^{0,91}} \text{ (kW/Tn)} \quad (9)$$

El índice de trabajo **Wi** da los kW que hay que aplicar para desmenuzar una tonelada de material de tamaño de grano teóricamente ilimitado, hasta que el 80 % del mismo pase por el tamiz de 0,10 mm. (H. Duda, 1997)

Tabla 2.3: Algunos índices de trabajo y pesos específicos de materiales.

Material	Peso específico (Tn/m ³)	Índice de trabajo (kW/Tn)
Clinker de cemento	3,09	13,49
Crudo para cemento	2,07	10,57
Arcilla	2,23	7,10
Arcilla calcinada	2,32	7,43
Yeso natural	2,69	8,16
Caliza(para cemento)	2,68	10,18

El índice de trabajo tomado es el de la caliza para cemento = 10,18 kW/Tn porque es el material de mayor dureza dentro de la mezcla de materiales que conforman el cemento LC³. (H. Duda, 1997)

Sustituyendo en (8)

$$B\varnothing\text{mm} = 20,17 * \sqrt{\frac{25\,000\,\mu\text{m}}{335}} * \sqrt[3]{\frac{10,18 \frac{\text{kW}}{\text{Tn}} * 2,79\text{g/cm}^3}{65 * \sqrt{0,8m}}}$$

$$B\varnothing\text{mm} = 20,17 * \sqrt{74,63} * \sqrt[3]{\frac{28,4}{57,85}}$$

$$B\varnothing\text{mm} = 20,17 * 8,64 * \sqrt[3]{0,49}$$

$$B\varnothing\text{mm} = 137,67\text{mm}$$

- ♦ El diámetro de bolas seleccionado es 130 mm, según el catálogo de bolas de la compañía SUPRASTEEL.

Con la colocación cúbica de las bolas de iguales dimensiones cuando las bolas contiguas se sitúan en el espacio por los vértices del cubo, entonces llenan el 52% del volumen ocupado por la carga de bolas. El restante 48% del volumen corresponden a los espacios entre bolas. Con la colocación tetraédrica, cuando las bolas contiguas se sitúan en el espacio por los vértices del tetraedro llenan el 74% del volumen de la carga de bolas y los espacios entre las bolas constituyen el 26% del volumen.

- ♦ En este caso la colocación de las bolas utilizada para el cálculo es tetraédrica, con la que se obtiene una densidad amontonada de bolas $\rho_b=3,56\text{ Tn/m}^3$.

Si el volumen de bolas en el molino es $V_b = 0,217\text{ m}^3$, la masa de las bolas (m_b) es calculado por la siguiente fórmula.

$$\begin{aligned} m_b &= V_b * \rho_b \\ m_b &= 0,217\text{ m}^3 * 3,56\text{ Tn/m}^3 \\ m_b &= 0,77\text{ Tn de bolas} \end{aligned} \tag{10}$$

- ♦ El molino debe ser cargado con 85 bolas de 130 mm de diámetro.

Tabla 2.4: Especificaciones dimensionales y durezas de las bolas.

$\varnothing$ (mm)	Tolerancia (mm)	Peso de la bola	No. Pcs./1Tn	HRC	Prueba de impacto (J/cm ²)
100	+3 -2	4 110	243	55-65	≥ 12
110	+4 -2	5 457	182		
120		7 102	140		
130		9 030	110		
140	+4	11 278	88		
150	-3	13 871	72		

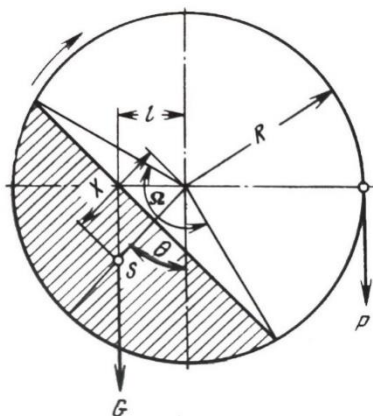
2.5-Productividad del molino de bolas.

Tabla 2.5: Parámetros para el cálculo de la productividad del molino de bolas.

Parámetros	Unidad de medida	MB-800	MB-Rediseñado
Diámetro interior del tambor giratorio.	m	0,8	0,8
Longitud del tambor giratorio.	m	0,8	1,2
Carga de bolas suministrada.	kg	560	770
Volumen del tambor.	m ³	0,402	0,6
Volumen de molida.	m ³	0,201	0,3
Producción.	m ³ /jornada de trabajo	0,51	1,8
Tiempo de molida.	minutos	60	60

- ♦ Se estiman 6 batches/día.

2.6-Potencia.

**Figura 2.4:** Esquema del régimen de cascada del molino de bolas.

Fuente: S.E. Andreiev (1980).

Para determinar la potencia útil con el régimen de cascada se utiliza la Figura 2.4 El segmento circular con el ángulo central Ω representa una sección transversal de la carga de bolas a la que vamos a considerar como un cuerpo denso con centro de gravedad en el punto S. (S.E. Andreiev, 1980). Con el movimiento del tambor del molino la carga de bolas por la fuerza de rozamiento gira en un ángulo θ y a la velocidad permanente de rotación queda todo el tiempo en la misma posición.

La fuerza de gravedad G de la carga es:

$$G = 1000 * g * \varphi * \frac{\pi * D^2}{4} * L * \rho_b \quad (11)$$

Donde:

Mb: Masa de la carga de bolas (Tn).

φ : Grado de llenado del molino (%).

D: Diámetro interior del tambor del molino (m).

L: Longitud del tambor (m).

ρ_b : Densidad amontonada de las bolas (Tn/m³), para una posición tetraédrica de las bolas.

Sustituyendo en (11)

$$G = 1000 * g * \varphi * \frac{\pi * D^2}{4} * L * \rho_b$$

$$G = 1000 * 9,8 \text{ m/s}^2 * 0,36 * \frac{\pi * 0,8 \text{ m}^2}{4} * 1,2 \text{ m} * 3,56 \text{ Tn/m}^3$$

$$G = 3\,528 \text{ m/s}^2 * 0,6 \text{ m}^3 * 3,56 \text{ Tn/m}^3$$

$$G = 7\,534,3 \text{ N}$$

$$G = 7,53 \text{ kN}$$

El momento de la fuerza de gravedad **G** de la carga de bolas respecto al eje del molino será:

Donde:

$$M = G * l \quad (12)$$

Donde:

l: Distancia de la línea perpendicular trazada desde el centro **O** a la dirección de la fuerza **G**.

$$l = x * \sin \theta \quad (13)$$

x: La distancia desde el centro **O** hasta el centro de gravedad **S**.

Tabla 2.6: Interpolación del ángulo θ para un 36% de coeficiente de llenado y 65% de la velocidad crítica de rotación.

$\gamma(\%)$	$\theta(\varphi=30\%)$	$\theta(\varphi=36\%)$	$\theta(\varphi=40\%)$
60	34,83°	-----	36,5°
65	35,83°	36,63°	37,17°
70	36,83°	-----	38,83°

$$x = \frac{2}{3} * \frac{R^3 * \sin^3 \frac{\Omega}{2}}{F} \quad (14)$$

Donde:

R: Radio del tambor del molino.

F: Área del segmento del círculo.

$$F = \varphi * \pi * R^2 \quad (15)$$

$$F = 0,36 * \pi * (0,4 \text{ m})^2$$

$$F = 0,18 \text{ m}^2$$

Tabla 2.7: Interpolación del ángulo formado por el segmento circular que corresponde al llenado del molino.

$\varphi(\%)$	Ω	$\sin^3 \Omega/2$
35	152,5°	0,916
36	158,2°	0,944
40	162°	0,963

Sustituyendo en (14)

$$x = \frac{2}{3} * \frac{0,4 \text{ m}^3 * 0,944}{0,18 \text{ m}^2}$$

$$x = \frac{2}{3} * \frac{0,06 \text{ m}^3}{0,18 \text{ m}^2}$$

$$x = 0,67 * 0,33 \text{ m}$$

$$x = 0,22 \text{ m}$$

Sustituyendo en (13)

$$l = 0,22 \text{ m} * \sin 36,63^\circ$$

$$l = 0,22 \text{ m} * 0,6$$

$$l = 0,132 \text{ m}$$

Sustituyendo en (12).

$$M = 7,53 \text{ kN} * 0,132 \text{ m}$$

$$M = 0,994 \text{ kN*m}$$

La potencia útil consumida por el molino será:

$$N = \frac{M * 2 * \pi * n}{60 * 1000} \quad (16)$$
$$N = \frac{994 * 2 * \pi * 34}{60 * 1000}$$

$$N = \frac{212\,238,9}{60\,000}$$

$$N = 3,54 \text{ kW}$$

2.7- Rediseño del tambor del molino.

En el Anexo 1 se presentan los planos del tambor con los cambios, con respecto al original, expuestos anteriormente.

3-DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DEL MOLINO DE BOLAS.

3.1-Selección del motorreductor.

- $n_{m\acute{a}q} = 34 \text{ rpm}$
- $N_{m\acute{a}q} = 3,54 \text{ kW}$

3.1.1-Selección del motor

- El motor seleccionado del Catálogo de Reductores y Motorreductores coaxiales ROSSIMOTORRIDUTTORI es el **132 M** (Ver Anexo 2) y el tamaño por el cual será encontrado en las tablas es 100, posee una potencia de $P_{mot} = 4 \text{ kW}$ la cual es mayor que la potencia necesaria a la entrada del reductor ($N_1 = 3,69 \text{ kW}$), este tiene una velocidad de rotación de 900 rpm y 6 polos.

$$N_1 = \frac{N_2}{0,96} = \frac{3,54}{0,96} = 3,69 \text{ kW} \quad (17)$$

3.1.2-Selección del motorreductor inicial.

Según el Anexo 3 se selecciona una relación de transmisión con una velocidad de salida de 35,5rpm, valor que se asemeja al necesario en la máquina y una velocidad de entrada de 900 rpm correspondiente con el valor de la velocidad del motor seleccionado anteriormente, lo que ofrece una relación de transmisión de 25, un momento torsor de 118 N*m y puede transmitir una potencia de 4,61 kW suficiente para el caso de esta transmisión.

3.1.3- Forma constructiva, cantidad de lubricante y dimensiones del reductor.

La forma constructiva utilizada en este caso es **B3** (Figura 3.1), ya que en el molino el motorreductor puede ser colocado correctamente de esta manera y de esta forma se utilizaría menor cantidad de aceite para su lubricación. En el Anexo 5 se explican las Generalidades de la instalación y manutención del motorreductor.

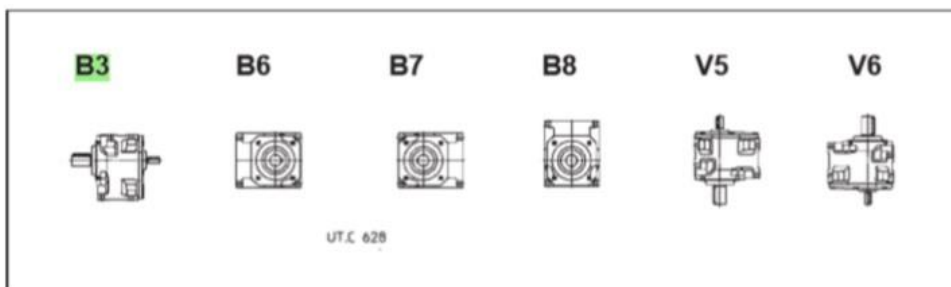


Figura 3.1: Formas constructivas.

Fuente: Catálogo de motorreductores E04.

Tabla 3.1: Cantidades de aceite de las formas constructivas de los reductores (I).

Tamaño	B3	B6, B7	B8, V6	V5
50, 51	0,8	1,1	1,1	1,4
63, 64	1,6	2,2	2,2	2,8
80, 81	3,1	4,3	4,3	5,5
100, 101	5,6	7,1	8	10
125, 126	10,2	13	14,6	18,3
140	11,6	14,8	16,6	21

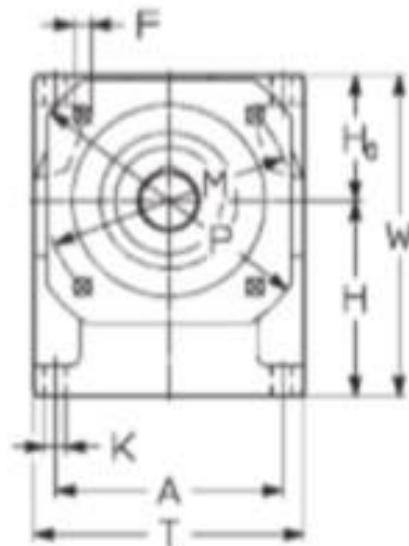
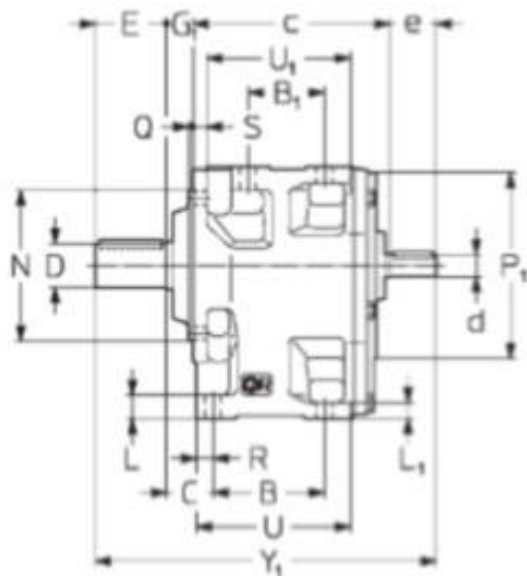


Figura 3.2: Dimensiones del reductor seleccionado.

Tabla 3.2: Valores de las dimensiones de varios modelos de reductores.

Tamaño	50, 51		63, 64		80, 81		100, 101	
A	124		153		192		240	
B	76		96		123		160	
B1	52		66		87		119	
C	30,5		36,5		43		51,5	
c	138		168		208		253	
ØD	24	28	32	38	38	48	48	55
E	50	42	58		80		82	
Ød	14		16		19		24	
Y1	234	226	285		360		422	
ØF	9,5		11,5		14		14	
G1	16		19		22		27	
H(h11)	106		132		160		195	
H0(h11)	71		85		106		132	

Ø K	11,5	14	17	18
L	17	20	24	28,5
L ₁	12	14	17	20
Ø M	130	165	215	265
Ø N (h6)	110	130	180	230
Ø P	160	200	250	300
Ø P ₁	140	160	200	250
R	13,5	16	19	22,5
S	10	12	14	16
T	148	182	226	280
U	110	136	171	214
U ₁	100	124	157	198
W ₁	177	217	266	327
Masa (kg)	12	20	35	62

3.1.4-Selección final de motorreductor.

- ♦ La selección final del motorreductor se toma de la Tabla 3.3 de la cual se puede saber la designación mediante el Anexo 4.
- ♦ La velocidad de rotación final de molino va a ser 36.1 rpm, la cual se puede aceptar teniendo en cuenta que la velocidad crítica del molino es 52,9 rpm.

Tabla 3.3: Programa de fabricación de motorreductores.

P ₁ (kW)	n ₂ (min ⁻¹)	M ₂ da N*m	Reductor-motor	i (relac. transm.)
33,6	109	0,8	MR 31 81 – 112 M	41,7
33,8	109	2,36	MR 31 125 – 112 M	41,5
36,1	102	1,25	MR 31 100 – 132 M	25
36,1	102	1,7	MR 31 101 – 132 M	25
37,1	101	2,12	MR 21 125 – 132 M	24,3
37,3	98	2,65	MR 31 125 – 112 M	37,5

3.1.5- Dimensiones del motorreductor.



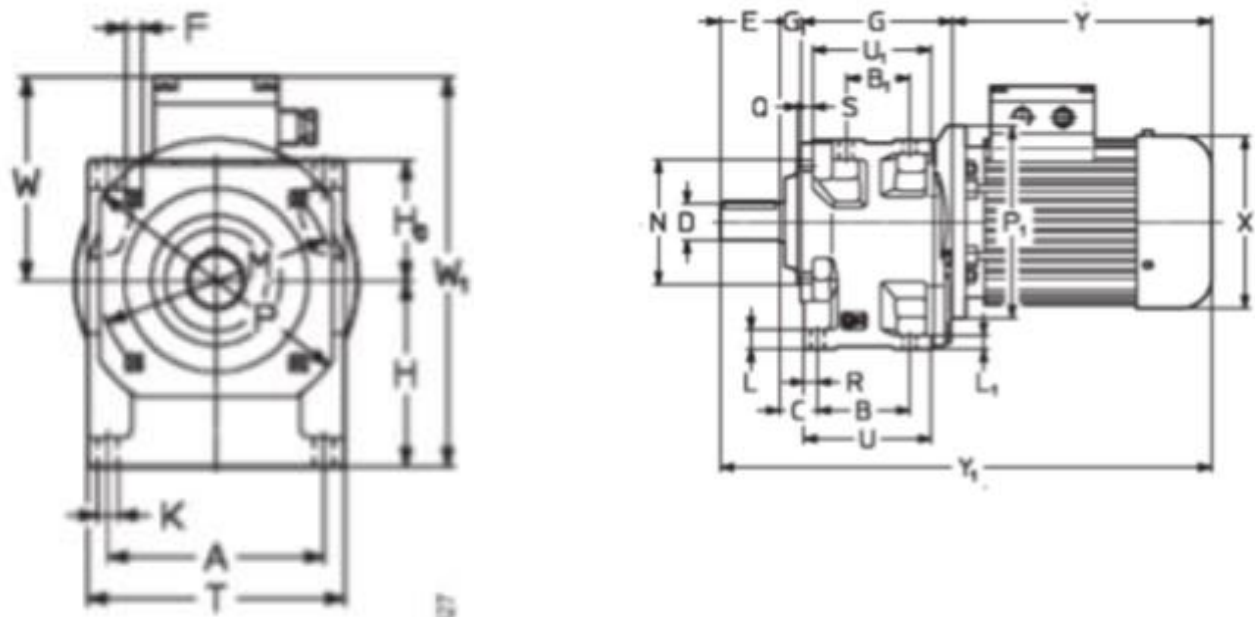


Figura 3.3: Dimensiones del motor y el reductor.

Tabla 3.4: Valores de dimensiones de varios modelos de motorreductores.

Tamaño	Red.	100, 101				
	Motor	90	100	112	132	160
A		240				
B		160				
B ₁		110				
C		51,5				
Ø D		48				
E		82				
Ø F		14				
G		242				258
G ₁		27				
H (h11)		195				
H ₀ (h11)		132				
K		18				
L		28,5				
L ₁		20				
Ø M		265				
Ø N (h6)		230				
Ø P		300				
R		22,5				
S		16				
T		280				
U		214				
U ₁		108				

$\varnothing P_1$		200	250	250	300	350
$\varnothing X$		180	207	207	260	315
Y		270	343	343	402	540
Y_1		621	694	694	753	907
W		149	164	164	196	235
W_1		344	359	359	391	430
Masa (kg)	Red.	80	87	94	122	152
	Motor	85	94	105	138	170

- ♦ Los tornillos de sujeción de las patas del reductor serán M16x50 o M16x60.

3.1.6-Dimensiones del lado de entrada de los reductores

El lado de entrada de los reductores tiene una brida con taladros roscados y centraje del «taladro» para la eventual fijación del soporte del motor u otros elementos. La eventual utilización del taladro roscado cerrado con perno de tope requiere el desmontaje del mismo perno (evitando la eventual pérdida de aceite) y restablecimiento del mastique.

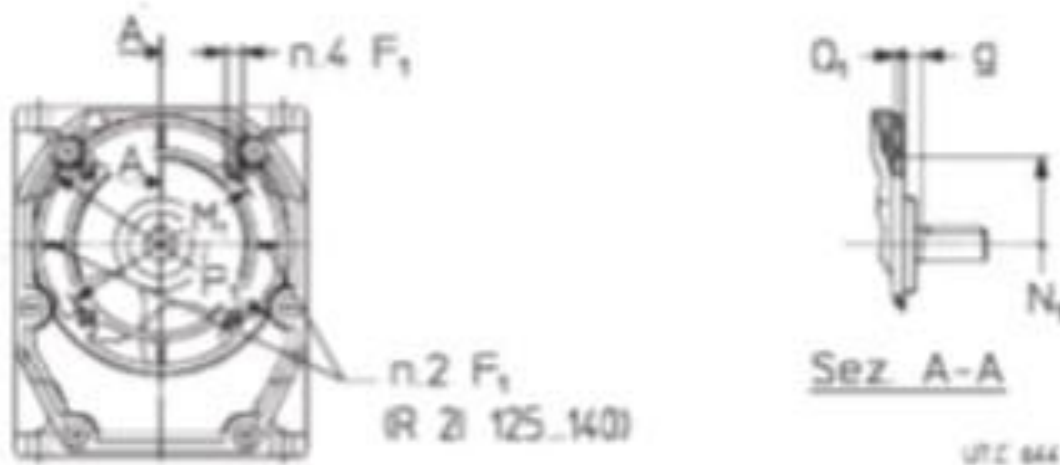


Figura 3.4: Dimensiones del acople de entrada de los reductores.

Tabla 3.5: Valores de las dimensiones del acople de entrada de varios reductores.

Tamaño reductor.	F_1	g	$M_1 \varnothing$	$N_1 \varnothing$	$P_1 \varnothing$	Q_1
63, 64	M 8	10	130	110	160	4,5
80, 81	M 10	10,5	165	130	200	4,5
100, 101	M 12	11	215	180	250	5
125, 126, 140	M 12	14	265	230	300	5
160, 180	M 16	19	350	300	400	6

3.1.7- Dimensiones del extremo del árbol de salida del reductor.

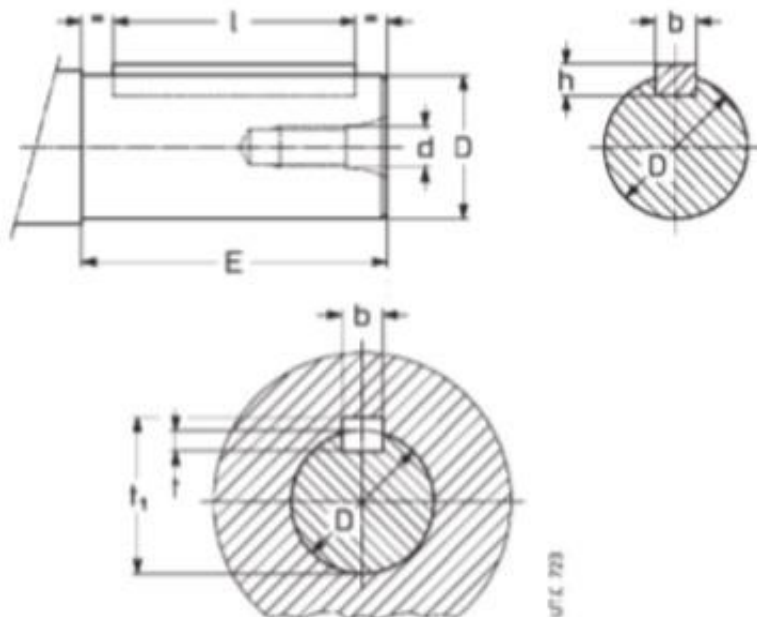


Figura 3.5: Dimensiones del extremo del árbol de salida del reductor.

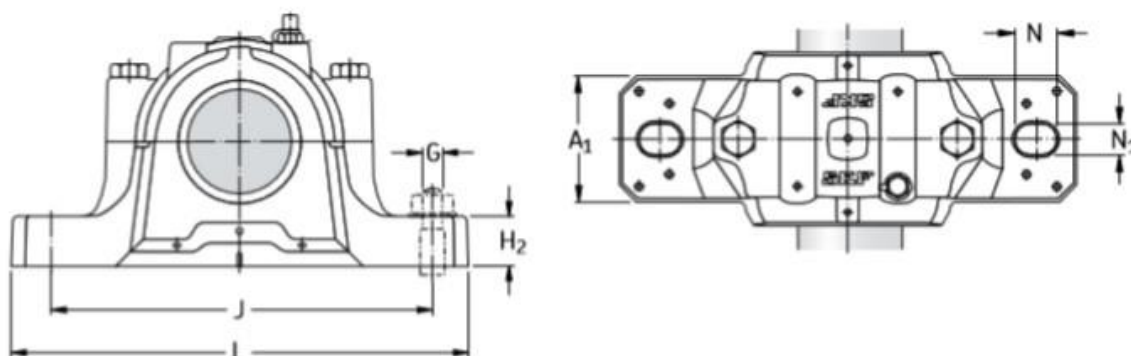
Tabla 3.6: Valores de las dimensiones del árbol de salida del reductores.

Extremo del árbol			Chaveta	Chavetero		
D Ø	E	d Ø	b x h x l	b	t	t ₁
45 k6	82	M 12	14 x 9 x 70	14	5,5	51,8
48 k6	82	M 12	14 x 9 x 70	14	5,5	51,8
55 m6	82	M 12	16 x 10 x 70	16	6	59,3

3.2-Selección de los soportes del tambor del molino.

Según el catálogo de soportes SKF.

Soportes de pie SNL para rodamientos sobre manguitos de fijación da 60 – 75 mm ya que el diámetro del escalón de apoyo es 75 mm.



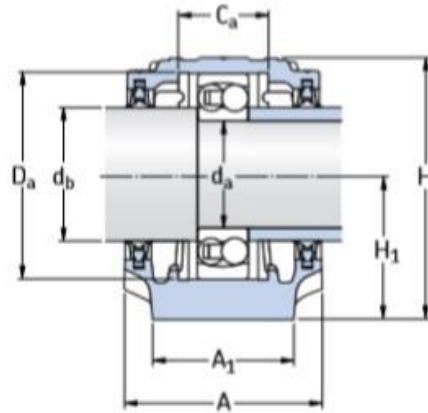


Figura 3.6: Dimensiones de los soportes de tambor del molino.

Fuente: Catálogo de motorreductores E04.

Tabla 3.7: Valores de las dimensiones del soporte.

Dimensiones	d_a	A	A_1	H	H_1	H_2	J	L	N	N_1	G	Masa
Unidad	mm											kg
Valores	75	115	80	155	80	30	230	280	24	18	16	6,60

Tabla 3.8: Valores de las dimensiones de asiento del rodamiento de bolas.

d_a	d_b	C_a	D_a	A_2	A_3	Rodamiento
mm						1215 K
75	85	56	130	133	195	

3.2.1-Dimensiones de los rodamientos de bolas del soporte del tambor.

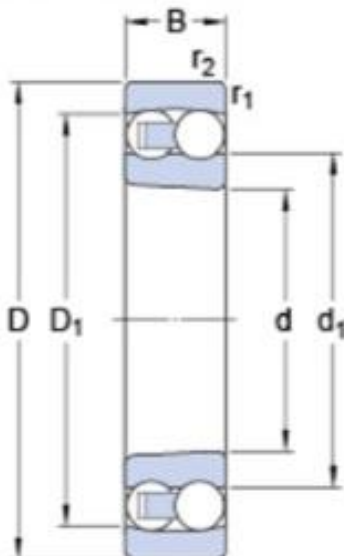


Figura 3.7: Dimensiones del rodamiento seleccionado para los soportes del tambor.

Tabla 3.9: Valores de las dimensiones del rodamiento de bolas seleccionado.

Rodamiento	d (mm)	D (mm)	B (mm)	d ₁ (mm)	D ₁ (mm)
1215	75	130	25	93,05	114,2

3.2.2-Tiempo de vida útil de los rodamientos del soporte del tambor.

$$L_{hR} = \frac{10^6 C_R}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{K_s \cdot F_{eq.}} \right)^{k'} \quad (18)$$

Donde:

Cr: Factor de ajuste por confiabilidad= 1 (90% de confiabilidad)

n: Velocidad de rotación= 36 rpm

C: Capacidad de carga dinámica= 39000 N

K: Exponente de la curva de fatiga de Wohler = 3 (Rodamientos de bolas)

Ks: Factor de aplicación= 1,5 – 3 (Maquinaria con impactos moderados)

Feq: Fuerza equivalente.

$$F_{eq} = (W_T + W_B + W_M) / 2 \quad (19)$$

Donde:

W_T- Peso del tambor.

W_B- Peso de las bolas.

W_M- Peso del material a moler.

Peso del tambor (W_T).

$$W_T = V_T \cdot \gamma \quad (20)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (21)$$

$$\gamma = 7\,850 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\gamma = 76\,930 \text{ N/m}^3$$

Donde:

ρ - Densidad del acero del tambor.

g - Aceleración de la fuerza de gravedad.

V_T - Volumen total del tambor.

γ - Peso específico del acero del tambor.

$$V_T = V_t + V_c + V_n \quad (22)$$

Donde:

V_T - Volumen total del tambor.

V_t - Volumen de las tapas del tambor.

V_c - Volumen del cilindro del tambor.

V_n - Volumen de los nervios de refuerzo.

$$V_t = \left(\frac{\pi * D t^2}{2} \right) * St \quad (23)$$

Donde:

D - Diámetro de las tapas = 0,87 m

St - Espesor de las tapas = 0,016 m

Sustituyendo en (23).

$$V_t = \left(\frac{\pi * 0,87^2}{2} \right) * 0,016 \text{ m}$$

$$V_t = 1,19 \text{ m}^2 * 0,016 \text{ m}$$

$$V_t = 0,019 \text{ m}^3 * 2$$

$$V_t = 0,04 \text{ m}^3$$

$$V_c = \left(\frac{\pi * D^2}{2} - \frac{\pi * d^2}{2} \right) * l \quad (24)$$

Donde:

D - Diámetro exterior del cilindro= 0,82 m

d - Diámetro interior del cilindro= 0,8 m

l - Longitud del cilindro= 1,2 m

Sustituyendo en (24)

$$V_c = \left(\frac{\pi * 0,82 \text{ m}^2}{4} - \frac{\pi * 0,8^2}{4} \right) * 1,2 \text{ m}$$

$$V_c = (0,53 \text{ m}^2 - 0,5 \text{ m}^2) * 1,2 \text{ m}$$

$$V_c = (0,03 \text{ m}^2) * 1,2 \text{ m}$$

$$V_c = 0,036 \text{ m}^2$$

$$V_n = \left(\frac{b * h}{2} \right) * S_n \quad (25)$$

Donde:

b- Longitud de la base del triángulo de los nervios del molino.

h- Altura del triángulo de los nervios del molino.

S_n- espesor de los nervios del molino.

Sustituyendo en (25)

$$V_n = \left(\frac{0,179 \text{ m} * 0,045 \text{ m}}{2} \right) * 0,008 \text{ m}$$

$$V_n = 0,004 \text{ m}^2 * 0,008 \text{ m}$$

$$V_n = (0,004 \text{ m}^2 * 0,008 \text{ m}) * 12 \text{ nervios}$$

$$V_n = 0,0004 \text{ m}^3$$

Sustituyendo en (22)

$$V_T = 0,04 \text{ m}^3 + 0,036 \text{ m}^3 + 0,0004 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0,076 \text{ m}^3$$

Sustituyendo en (20)

$$W_T = 0,076 \text{ m}^3 * 76\,930 \text{ N/m}^3$$

$$W_T = 5846,68 \text{ N}$$

Peso de las bolas (W_B).

$$W_B = m_b * g \quad (26)$$

Donde:

m_b - Masa de las bolas de molienda= 770 kg

Sustituyendo en (26)

$$W_B = 770 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$W_B = 7\,546 \text{ N}$$

Peso del material a moler (W_M).

$$W_M = V_m * \gamma_m \quad (27)$$

Donde:

V_m - Volumen de material.

γ_m – Peso específico del material.

Sustituyendo en (27)

$$W_M = 0,3 \text{ m}^3 * 2\,790 \text{ kg/m}^3$$

$$W_M = 837 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$W_M = 8\,202,6 \text{ N}$$

Sustituyendo en (19)

$$F_{eq} = (5\,846,68 \text{ N} + 7\,546 \text{ N} + 8\,202,6 \text{ N}) / 2$$

$$F_{eq} = (21\,595,28 \text{ N}) / 2$$

$$F_{eq} = 10\,797,64 \text{ N}$$

Sustituyendo en (18)

$$L_{h_R} = \frac{10^6 * 1}{60 * 36 \text{ rpm}} * \left(\frac{39\,000 \text{ N}}{1.5 * 10\,797,64 \text{ N}} \right)^3$$

$$L_{h_R} = 462,96 * \left(\frac{39\,000 \text{ N}}{16\,196,46 \text{ N}} \right)^3$$

$$L_{h_R} = 462,96 * (2,4)^3$$

$$L_{h_R} = 462,96 * 13,83$$

$$L_{h_R} = 6\,402,74 \text{ horas}$$

CONCLUSIONES

- Con la finalidad de incrementar la capacidad de producción del molino MB-800 se decidió, sobre la base de los cálculos pertinentes, incrementar la longitud del tambor a 1,2 m.
- Debido al aumento de la longitud del tambor fue necesario:
 1. Recalcular el espesor de la chapa del tambor del molino: 10 mm.
 2. Utilizar el rodamiento SKF 1215K y el soporte asignado en el catálogo según las dimensiones de este rodamiento, teniendo este un tiempo de vida útil aproximado de 6 400 horas laborando en las condiciones de trabajo definidas en el capítulo 1.
 3. Aumentar la distancia entre centros hasta 1.44 m de los soportes del tambor del molino y con esto la estructura de este.
- En los epígrafes **2.2, 2.6, 3.1, 3.2** del presente documento se muestran los cálculos realizados para garantizar un buen trabajo, tanto del proceso de molienda, como del funcionamiento mecánico del molino de bolas rediseñado. Como se puede apreciar todos estos elementos cumplen con las condiciones exigidas.

Anexo 1: Planos de piezas y ensambles el molino de bolas.

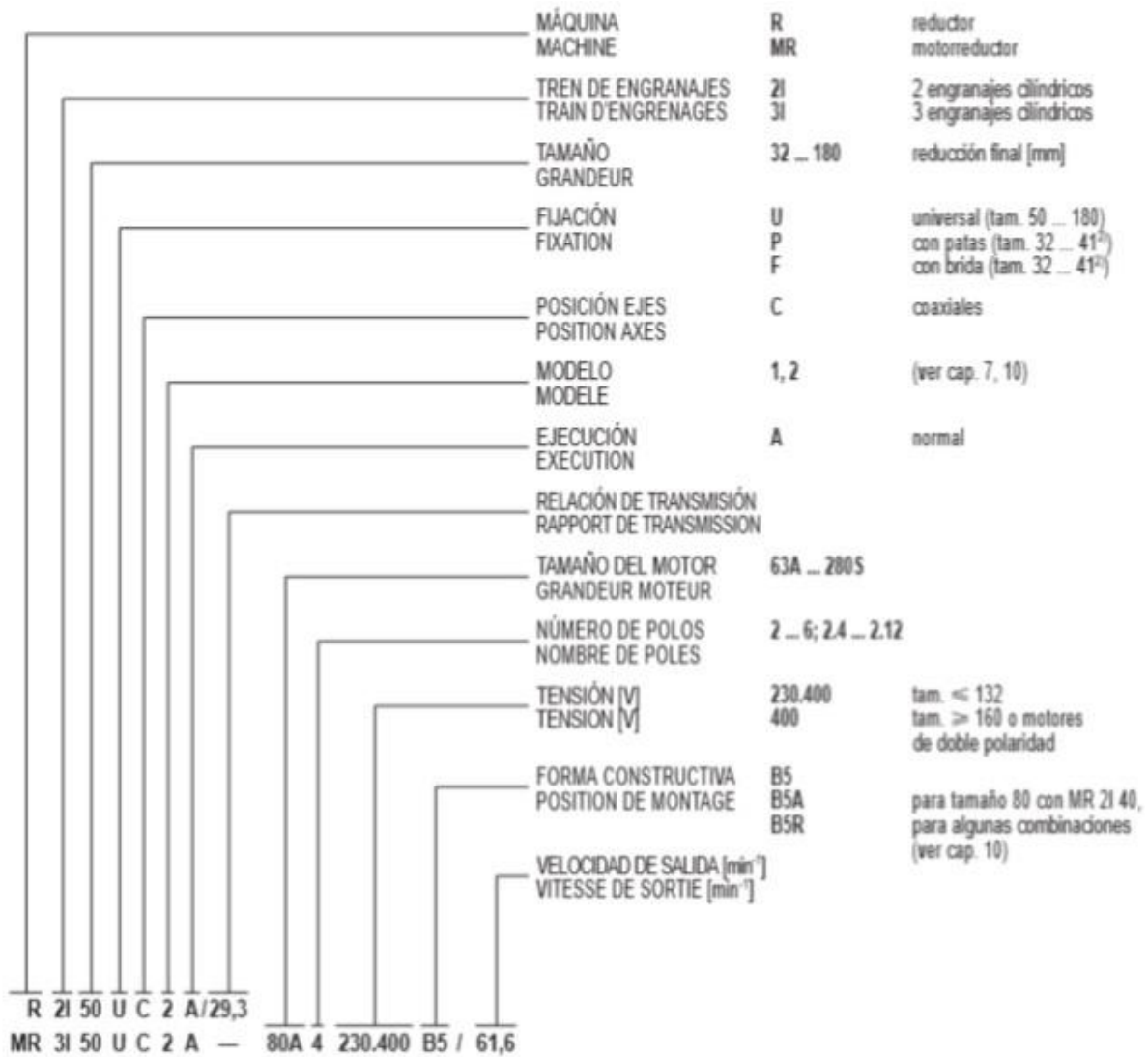
Anexo 2: Características principales de los motores.

Tamaño motor Grandeur moteur	M_{max} = daN m 2) 4)	2 polos - pôles - 2 800 min ⁻¹)					4 polos - pôles - 1 400 min ⁻¹)					6 polos - pôles - 900 min ⁻¹)				
		P_1	J_0	z_0	Marronque - déman	M_{L1} =	P_1	J_0	z_0	Marronque - déman	M_{L1} =	P_1	J_0	z_0	Marronque - déman	M_{L1} =
		kW	= kg m ² 2)	3)	3)		kW	= kg m ² 2)	3)	3)		kW	= kg m ² 2)	3)	3)	
132 S	7,5	—	—	—	—	—	5,5	0,0216	1 800	3	—	3	0,0216	2 360	2,3	—
132 SA	7,5	5,5	0,0099	1 250	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132 SB	7,5	7,5	0,0118	1 120	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132 SC	7,5	9,2 *	0,0137	1 060	3,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132 M	15	11 *	0,0178	850	3,7	—	7,5	0,0323	1 180	3,2	—	4	0,0323	1 420	2,9	—
132 MB	15	15 *	0,0226	710	3,8	—	9,2 *	0,0391	1 070	3	—	5,5	0,0391	1 260	2,6	—
132 MC	15	—	—	—	—	—	11 *	0,0424	900	3,4	—	7,5 *	0,0532	1 000	2,4	—

Anexo 3: Potencias y pares nominales.

n_{N2} n_i min ⁻¹			Tamaño reductor - Grandeur réducteur														
			P_{N2} kW M_{N2} daN m ... / i														
			32	40	50	51	63	64	80	81	100	101	125	126	140	160	180
35,5	1 400	40	—	0,215 5,9 21/40,4	0,59 15,5 31/38,4	0,81 21,2 31/38,4	1,15 32,7 31/41,6	1,5 42,6 31/41,6	2,2 65 31/43,6	2,87 85 31/43,6	4,91 129 31/38,4	6,5 170 31/38,4	9,2 259 31/41,5	11,9 337 31/41,5	16,5 476 31/42,3	22,9 674 31/43,1	32,3 953 31/43,3
	1 120	31,5	—	—	0,58 15,8 31/31,9	0,81 22,1 31/31,9	1,14 33,1 31/34,2	1,53 44,5 31/34,2	2,37 66 31/32,8	3,19 89 31/32,8	4,78 130 31/32	6,5 177 31/32	9 262 31/34,1	12,1 351 31/34,1	17,9 495 31/32,4	25,2 703 31/32,7	34,3 990 31/33,9
	1 120	31,5	—	0,237 6,7 21/33,1	0,51 12,7 21/29,3	—	0,96 26,2 21/31,9	—	1,94 53 21/31,8	—	4,33 108 21/29,3	—	—	—	—	—	—
	900	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,5 265 31/26,2	12,8 355 31/26,2	14,9 463 31/29,3	26,2 710 31/25,5	29,4 922 31/29,5
	900	25	—	0,26 7,3 21/26,5	0,55 14 21/24,1	0,72 18,4 21/24,1	1,12 29,6 21/25	1,37 36,2 21/25	2,15 59 21/26	2,63 72 21/26	4,61 118 21/24,1	5,7 144 21/24,1	8,2 210 21/24,3	—	—	—	—

Anexo 4: Designación de los motorreductores.



Anexo 5: Generalidades de la instalación y la manutención del motorreductor.

Asegurarse que la estructura sobre la que está fijado el reductor o el motorreductor sea plana, nivelada y suficientemente dimensionada para garantizar la estabilidad de la fijación y la ausencia de vibraciones, considerando todas las fuerzas transmitidas causadas por las masas, el par, las cargas radiales y axiales. Instalar el reductor o el motorreductor de modo tal que se tenga un amplio paso de aire para la refrigeración del reductor y del motorreductor (sobre todo del lado del ventilador del motor). Evitar que se verifiquen: estrangulaciones en los pasos del aire; fuentes de calor cercanas al reductor que puedan influir en la temperatura del aire de refrigeración del reductor (por irradiación); insuficiente recirculación del aire y en general aplicaciones que perjudiquen la disipación normal del calor. Montar el reductor de modo que no sufra vibraciones. En presencia de cargas externas usar, si fuera necesario, clavijas o topes positivos. En la fijación entre reductor y máquina y/o entre reductor y eventual brida B5, se recomienda utilizar adhesivos de bloqueo tipo LOCTITE en los tornillos de fijación (también en las superficies para fijación con brida). Para instalación al aire libre o en ambiente agresivo, pintar el reductor o el motorreductor con pintura anticorrosiva, protegiéndolo eventualmente también con grasa hidrorrepelente (especialmente en las pistas rotativas de los retenes y en las zonas accesibles de los extremos del árbol). Cuando sea posible, proteger el reductor o el motorreductor mediante medios adecuados contra los rayos del sol y la intemperie: esta última protección resulta necesaria cuando los ejes lento o rápido son verticales o cuando el motor es vertical con el ventilador en la parte superior.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Abreu Cerdá, Dairon Josue. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil “Evaluación económica y ambiental de plantas prototipo de pequeño y mediano tamaño para la producción de Cemento LC³”. -- Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 2017--.
2. Aguilar Contreras, Yairan. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil “Cementos de bajo carbono LC³ producidos en condiciones de pequeña escala, para la fabricación de bloques huecos de hormigón hidráulico y hormigones de hasta 20 MPa”, -- Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 2015--.
3. Alcántara Valladares, Juan Ramón. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico “Diseño practico de un molino de bolas”, --D. F-México. 2008--.
4. Andreiev, S. E., V. A. Perov, V. V. Zverievich. Trituración, Desmenuzamiento y cribado de minerales. --URSS. 1980--.
5. Arbona Armas, Claudia. Tesis para la obtención de título de Ingeniero Civil “Montaje del protocolo de evaluación de la corrosión del acero de refuerzo en hormigones de LC3, mediante el método de corriente impresa”, --Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2017--.
6. Botero F., J. Renteria, J. G. Torres, H. E. Jaramillo, N. A. de Sánchez, H. Sánchez Sthepa. “Diseño de un molino de bolas tipo Atritor”. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2009.
7. Catálogo de motorreductores coaxiales ROSSIMOTORIDUTTORI. Disponible en [http:// E04%20Motorreductores%20Coaxiales.pdf](http://E04%20Motorreductores%20Coaxiales.pdf).
8. Catálogo de planchas laminadas en caliente. Disponible en: <http://www.Multiaceros.com>.
9. H. Duda, Walter. “Manual tecnológico del cemento”. --España: Editores Técnicos Asociados SA. 1997--.
10. Herrera Anchatuña, Diego Fernando. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica “Diseño y construcción de una máquina elevadora de carga para transportar material cerámico de forma automatizada hacia dos

- molinos de bolas, respaldada en un software CAE para el análisis correspondiente, en la empresa “Novel”. --Ecuador. 2013--.
11. Herrera Mesa, José Juan. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil “El taller de Ecomateriales”. --Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 2008--.
 12. Hinojosa Quispe, Joel Harry. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Mecánico Electricista “Diseño y simulación de un molino de bolas horizontal de 15 [T/h] aplicado a una planta concentradora mediante el uso de software CAD especializado”. --Puno-Perú. 2017--.
 13. Loinaza, Juan Camilo. Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Mecánico. “Diseño de una tapa de descarga para un molino de bolas en la empresa SENCO COLOMBIANA S.A.”. – Medellín, 2009--.
 14. Montano Zaldívar, Rolando. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil “Evaluación de la carbonatación en especímenes elaborados con cementos de bajo carbono LC3”, --Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 2017--.
 15. Pérez Gálvez, Alberto. Lima Quesada, Danis. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico “Diseño preliminar de un molino de bolas para la fabricación de cemento puzolánico”. --Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 1998--.
 16. Pérez Toledo, Elier. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil “Activación térmica de arcillas, relación entre las condiciones de obtención de los desechos cerámicos y la actividad puzolánica”. --Santa Clara-Cuba, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. 2017--.
 17. Propiedades del acero A36. Disponible en <http://Abastecedora%20de%20Aceros%20y%20Maquilas%20SA%20de%20CV.html>.
 18. Revista Cubana de Ingeniería, 20117, Volumen VIII, ISSN 2223-1781 disponible en http://rci.cujae.edu.cu/files/Vol_8_No_1_2017.pdf, Revisado 15 de junio 2018.
 19. Shubin, V. S. and C. Pedre. Diseño de maquinaria industrial. –Cuba: Editorial Pueblo y educación. 1977--.
 20. Tintaya, M. Manual de Operación Planta Concentradora. --Perú. 2012--.
 21. www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.PropiedadesCEMENTOS.pdf

