

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRICA,
ELECTRONICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELECTRICA**



TESIS

**“PROTOCOLO DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN DE
MOLINO SEMIAUTOGENO CON ACCIONAMIENTO SIN
ENGRANAJES”**

PRESENTADO POR:

WILDER PEDRO MOYA ARCANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

**“PROTOCOLO DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN DE MOLINO
SEMIAUTOGENO CON ACCIONAMIENTO SIN ENGRANAJES”**

TESIS PRESENTADA POR:

MOYA ARCANA WILDER PEDRO

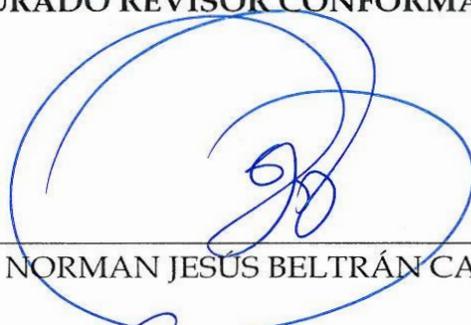
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 - 10 - 2018

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:



DR. NORMAN JESÚS BELTRÁN CASTAÑÓN

PRIMER MIEMBRO:



M.SC. MARIO MAMANI PAMPA

SEGUNDO MIEMBRO:



M.SC. HENRY SHUTA LLOCLLA

DIRECTOR / ASESOR:



M.SC. JOSÉ MANUEL RAMOS CUTIPA

Área : Mecánica

Tema : Diseño Para La Construcción De Maquinas

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres Valentín y Lizaura, siempre han sido un ejemplo para mí. Gracias a ello estoy alcanzando mis metas con mucho orgullo. Les debo un eterno agradecimiento y mi retribución total por su gran amor.

A mi esposa Marivel desde que nos conocimos siempre me has ayudado en todo lo que has podido, siempre me has dado lo mejor de ti, sé que todo lo haces con tal de verme feliz. Es por todo ese esfuerzo que te debo mi eterno agradecimiento.

A mi hijo Edrick, gracias porque a pesar de tu corta edad comprendiste y me brindaste tiempo suficiente para poder seguir con mis metas, tiempo de juego que tuvimos que recortar, gracias querido hijo.

A mis queridos hermanos Jhon, Lizlinda y Guicelia gracias por su apoyo incondicional y por demostrarme el gran cariño y fe que tienen para conmigo.

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis Padres y mi Hijo, a mis Padres por nunca haber dudado de mí, muy por el contrario, siempre han estado dándome fortaleza desde muy pequeño, apoyando mis ideas y mis proyectos por más descabellados que estos sonaran, otorgándome la confianza necesaria para afrontar las responsabilidades futuras y ser la persona que soy hoy. A mi Hijo por ser la fortaleza que necesitaba para emprender todos los proyectos que tenía programados.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE ANEXOS.....	13
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	14
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
CAPITULO I.....	17
1.1 INTRODUCCIÓN.....	18
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION.....	20
1.2.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA.	20
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.	21
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	22
CAPITULO II.....	23
REVISIÓN DE LITERATURA	24
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
2.1.1 INVESTIGACION EN MOLIENDA.	24
2.1.2 SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO SIN ENGRANAJES.	27
2.2 SUSTENTO TEÓRICO.....	30
2.2.1 MOLTURACIÓN INDUSTRIAL (MOLIENDA).....	30
2.2.2 FUERZAS DOMINANTES EN LA TRITURACIÓN O MOLIENDA	32

2.2.3. SISTEMAS GENERALES DE LAS INSTALACIONES Y EQUIPOS ...	35
2.2.4 ZONAS INTERIORES DE UN MOLINO DURANTE EL FUNCIONAMIENTO.....	36
2.2.5 CIRCUITOS DE FRAGMENTACIÓN	38
2.2.5.1 CIRCUITOS ABIERTOS.	40
2.2.5.2 CIRCUITOS CERRADOS.....	42
2.2.6 CALCULOS DE DISEÑO DE MOLINO SEMIAUTOGENO	44
2.2.6.1 DETERMINACIÓN DE LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN	45
2.2.6.2 DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	45
2.2.6.3 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES INICIALES DE DISEÑO	45
2.2.6.4 METODOLOGIA DE CALCULO BASADO EN ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND.....	47
2.2.6.4.1. DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ESPECÍFICO DEL CIRCUITO GLOBAL.	49
2.2.6.4.2. PARTICIONAR LA ENERGÍA TOTAL DEL PROCESO.	50
2.2.6.4.3. DETERMINAR EL TAMAÑO DEL MOLINO Y POTENCIA DEL MOTOR.	51
2.2.6.5. CALCULO DE CRITERIOS DE OPERACIÓN.....	53
2.2.6.5.1. ALTURA DE CARGA	53
2.2.6.5.2. VOLUMEN DE CARGA.....	54
2.2.6.5.3. DIMENSIONES DE ELEMENTOS MOLTURADORES INICIALES.	56

2.2.6.5.4. DIMENSIONES DE ELEMENTOS MOLTURADORES DE REEMPLAZO.....	57
2.2.6.5.5. DENSIDAD DE LOS ELEMENTOS MOLTURADORES.....	59
2.2.6.5.6. ROTACIÓN DEL MOLINO Y VELOCIDAD CRITICA	60
2.2.6.5.7. POTENCIA DEL MOLINO.....	64
2.2.6.7. DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	65
2.2.6.7.1. SISTEMA DE DESCARGA.....	66
2.2.6.7.2. ESPESOR DE LA CARCASA	69
2.2.6.7.3. ESPESOR DEL TRUNNION	70
2.2.6.7.4. BLINDAJES Y REVESTIMIENTOS.....	71
2.2.6.7.5. MATERIAL DE LEVANTADORES, BLINDAJES Y REVESTIMIENTOS.....	72
2.2.6.8. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE SISTEMA DE DESCANSO.....	72
2.2.6.9. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	80
2.2.6.9.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL ACCIONAMIENTO.....	80
2.2.6.9.2. ACCIONAMIENTOS SIN ENGRANAJES GEARLESS.....	84
2.2.6.9.3. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES.....	85
2.2.6.9.4. PROCESO DE DISEÑO	86
2.2.6.9.5. DISEÑO DE CONVERTIDOR Y SISTEMA DE CONTROL	88
2.2.6.9.6. DISEÑO ELÉCTRICO DEL MOTOR.....	89

2.2.6.9.7. DISEÑO MECÁNICO DEL MOTOR	90
2.2.6.9.8. INGENIERÍA DE SISTEMA SIMULTANEO	94
2.2.6.9.9. HERRAMIENTAS DE DISEÑO	95
2.2.6.9.10. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA	97
2.2.6.9.11. EXPERIENCIA DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA EN EL TIEMPO	98
2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	99
2.3.1. HIPOTESIS GENERAL.....	99
2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.	100
CAPITULO III.....	101
MATERIALES Y MÉTODOS.....	102
3.1. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	102
3.2. POBLACION Y MUESTRA DE INVESTIGACION.....	102
3.2.1. UBICACIÓN.....	102
3.2.2. ACCESIBILIDAD	102
3.2.3. CLIMA.....	103
3.2.4. CONCESIONES MINERAS	104
3.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCION DE INFORMACION:	104
3.4. TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS: .	105
3.5. PLAN DE TRATAMIENTO DE DATOS	105
3.5.1. PROTOCOLO DE DISEÑO DE MOLINO DE BOLAS	107

3.5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	109
3.5.1.2. COMPONENTES GLOBALES DE DISEÑO.....	111
3.5.1.3. COMPONENTES ESPECÍFICOS DE DISEÑO.....	121
CAPITULO IV	127
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	128
4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	128
4.1.2. DIMENSIONAMIENTO DE MAQUINARIA EN DISEÑO.....	128
4.1.3. CORROBORACIÓN DE DATOS DE DISEÑO DE MOLINO SEMIAUTOGENO	130
4.1.3.1. SIMULACIÓN DE FUERZAS ACTUANTES EN LA CARCASA.....	133
4.1.3.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA TENSIONES.....	134
4.1.3.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA DESPLAZAMIENTOS.	135
4.1.3.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA DEFORMACIONES. ...	136
CONCLUSIONES	142
RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2. 1: Zonas del interior de un molino.	38
Figura N°2. 2: Circuito abierto.....	40
Figura N°2. 3: Circuito abierto clasificador fragmentador.	41
Figura N°2. 4: Circuito cerrado fragmentador clasificador.	43
Figura N°2. 5: Circuito cerrado clasificador fragmentador.	44
Figura N°2. 6: Relación potencia del motor, diámetro y longitud efectiva.	52
Figura N°2. 7: Parámetros de medición de profundidad de carga.	55
Figura N°2. 8: Diagrama de cuerpo libre de elementos molturadores.	60
Figura N°2. 9: Diagrama de movimiento de carga dentro del molino.	63
Figura N°2. 10: Diagrama de implementación de molino de bolas.	66
Figura N°2. 11: Diagrama de cuerpo libre del molino.	68
Figura N°2. 12: Almohadilla hidrostática.	73
Figura N°2. 13: Esquema de funcionamiento de pads.	74
Figura N°2. 14: Esquema de instalación de pads.	74
Figura N°2. 15: Esquema de sistema hidráulico.	75
Figura N°2. 16: Posicionamiento de dos pads maestros.....	76
Figura N°2. 17: Esquema de pads maestro – esclavo.	77
Figura N°2. 18: Esquema de eje en descanso - diagrama de presión.....	78
Figura N°2. 19: Instalación de polo en carcasa de molino – rotor.	99
Figura N°3. 1: Diagrama de componentes del protocolo.....	106
Figura N°3. 2: Descripción de componentes del protocolo.....	108
Figura N°3. 3: Esquema de proceso de molienda.....	110
Figura N°3. 4: Esquema de molienda en molino semiautogeno.	111
Figura N°3. 5: Características de elementos molturadores.	119

Figura N°4. 1: Vista lateral de CAM del molino.	129
Figura N°4. 2: Vista perspectiva de CAM del molino.	130
Figura N°4. 3: Vista perspectiva CAM del molino.	130
Figura N°4. 4: Vista posterior de CAM del molino.	131
Figura N°4. 5: Vista lateral de CAM del molino.	132
Figura N°4. 6: Implementación de malla para proceso de simulación.	133
Figura N°4. 7: Representación de fuerzas actuantes en el molino.	133
Figura N°4. 8: Representación de tensiones en el molino.	134
Figura N°4. 9: Tensiones en el molino vista perspectiva.	134
Figura N°4. 10: Representación de desplazamientos en el molino.	135
Figura N°4. 11: Desplazamientos en el molino vista perspectiva.	135
Figura N°4. 12: Representación de deformaciones en el molino.	136
Figura N°4. 13: Deformaciones en el molino vista perspectiva.	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°2. 1: Escalones de la fragmentación.	31
Tabla N°2. 2: Rangos de tamaño típico índice de trabajo de bond.....	48
Tabla N°2. 3: Valores de factor de molino.....	57
Tabla N°3. 1: Altura de carga.....	116
Tabla N°3. 2: Características de elementos de molienda por diámetro.	119
Tabla N°4. 1: Detalle de características de implementación.	137
Tabla N°4. 2: Detalle de funcionamiento de molino semiautogeno.	137
Tabla N°4. 3: Datos generales del molino semiautogeno.....	138
Tabla N°4. 4: Datos del casco del molino semiautogeno.	139
Tabla N°4. 5: Datos de los cojinetes principales.	140
Tabla N°4. 6: Datos del cabezal trunnion.....	141
Tabla N°4. 7: Datos de revestimiento de molino semiautogeno.	141
Tabla N°4. 8: Discusión investigaciones anteriores.	142

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°1: Componentes externos del molino.....	149
Anexo N°2: Componentes internos del molino.....	150
Anexo N°3: Vista de ensamblaje.....	151
Anexo N°4: Vista de ensamblaje.....	152
Anexo N°5: Trunnion de Ingreso.....	153
Anexo N°6: Tapa carcasa de ingreso.....	154
Anexo N°7: Blindaje carcasa de ingreso.....	155
Anexo N°8: Carcasa tipo A.....	156
Anexo N°9: Blindaje interno tipo A.....	157
Anexo N°10: Carcasa tipo B.....	158
Anexo N°11: Blindaje interno tipo B.....	159
Anexo N°12: Tapa de carcasa de salida.....	160
Anexo N°13: Blindaje carcasa de salida.....	161
Anexo N°14: Trunnion de salida.....	162

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CAD	Computer Aided Design.
CAM	Computer Aided Manufactured.
ASTM	American Society of Testing Materials.
SAG	Semiautogeno.
GMD	Gearless Mill Drives (accionamiento sin engranajes).
PAD	Almohadilla.
TS	Tonelada Seca.
EGL	Longitud Efectiva de Molienda.
RPM	Revoluciones Por Minuto.

RESUMEN

El presente documento contiene información correspondiente al diseño de un molino semiautogeno, para este caso particular de un molino de bolas, para lo cual se hace uso de cálculos matemáticos para obtención de dimensiones previas, así como de dimensiones finales, dichos datos son contrastados por simulaciones realizadas por computadora mediante un software CAD. Mediante la obtención de los presentes resultados se desea obtener un protocolo de diseño que nos permita poder realizar el cálculo de maquinaria para otros tipos de condiciones. Así mismo se realiza una recopilación de información correspondiente al proceso de molienda, características de dimensionamiento de molinos, características de funcionamiento de molinos. Los mismos que nos permitirán tener un mejor entendimiento y el porqué de la determinación de las características optadas para el presente diseño. Durante la determinación de la implementación del protocolo de diseño se consideraron fases como características para las cuales se debía de realizar el diseño, características globales del diseño llámese longitud altura, características específicas de diseño llámese dimensiones de cada uno de los componentes del diseño, evaluaciones de diseño tanto por componente como de manera global para poder realizar de manera final la emisión de planos de fabricación. Así mismo se contempló la implementación de componentes que por la complejidad de equipos adicionales para su funcionamiento implementaran equipos de existencia en el mercado.

Palabras Clave: molienda, molino, semiautogeno, diseño, dimensionamiento

ABSTRACT

The present document contains information corresponding to the design of a semiautogeno mill, for this particular case of a ball mill, for which mathematical calculations are used to obtain previous dimensions, as well as final dimensions, said data are contrasted by simulations performed by computer using CAD software. By obtaining the present results we want to obtain a design protocol that allows us to perform the calculation of machinery for other types of conditions. Likewise, a compilation of information corresponding to the milling process, characteristics of sizing of mills, operating characteristics of mills is carried out. The same ones that will allow us to have a better understanding and the why of the determination of the characteristics chosen for the present design. During the determination of the implementation of the design protocol, phases were considered as characteristics for which the design had to be carried out, overall characteristics of the design, ie height, specific design characteristics, dimensions of each of the components of the design, evaluations of design both by component and globally to be able to carry out the final production of manufacturing plans. Likewise, the implementation of components was contemplated that, due to the complexity of additional equipment for its operation, will implement existing equipment in the market.

Keywords: grinding, mill, semiautogeno, design, sizing

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con cantidades enormes de minerales los cuales vienen siendo explotados desde hace siglos, incrementándose de acuerdo al conocimiento del territorio en los cuales se encuentran presentes los minerales ha ido en progreso. De igual forma la tecnología ha permitido poseer maquinarias cada vez más eficientes para el procesamiento de dichos minerales sin embargo en la actualidad, dichas maquinarias son importadas en su totalidad comprándose por esto accesorios y repuestos de las mismas. La industria que se dedica al diseño e implementación de maquinaria correspondientes al procesamiento de minerales en el país, generalmente trabaja de manera empírica con lo cual no se llega a un desarrollo pleno de dichas maquinarias en nuestro país.

La fase de molienda para el procesamiento de minerales es la más importante e imprescindible debido a que en función a ella se determina la eficiencia de la planta de procesamiento de minerales en su conjunto.

CAPITULO I: El desarrollo del presente proyecto alude a la falta de producción de maquinaria a escala industrial que nos permita satisfacer necesidades actuales ya sea para la implementación como para la elaboración de repuestos de los mismos, mediante la presente investigación se busca la obtención de un protocolo que nos permita poder realizar la fabricación de la maquinaria en diseño, que el presente protocolo nos sirva a fin de poder implementar equipos similares con característica de diseño diferentes. En vista que todo lo formulado se puede aplicar de manera directa al dimensionamiento de maquinaria similares en nuestra región.

CAPITULO II: el sustento teórico del presente proyecto se basa en el proceso de molienda realizado de manera previa para el procesamiento de minerales en la industria minera teniendo como consideración la implementación de sistemas actualmente utilizados para el accionamiento.

El proceso de molienda es la parte fundamental, los procesos se pueden realizar de manera autógena, proceso que no requieren de accesorios de molienda o de manera semiautogeno, necesita accesorios de molienda barra o bolas, los mismos que al encontrarse libres dentro del cuerpo cilíndrico del molino son elevados y se precipitan en las paredes del molino el mismo que cuenta con un blindaje para evitar daños en la carcasa del mismo es entre estos blindajes y los elementos molturadores que se realiza la disminución del tamaño del material que ingresa por abrasión, impacto y fricción, para posteriormente ser enviados mediante un diafragma de descarga hacia los procesos posteriores.

CAPITULO III: se determinó una metodología en la cual estaría basada el protocolo de diseño del molino, teniendo las siguientes consideraciones:

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO: consideraciones previas para el pre-dimensionamiento de los componentes a ser implementados como son lugar de implementación para que se requiere la maquinaria, en el proyecto se requería una maquinaria que nos pudiera transformar un producto de un tamaño de 150 mm a 0.24 mm en 3200 toneladas secas de material por hora.

COMPONENTES GLOBALES DE DISEÑO: Características que vinculen al molino de manera global como dimensiones del molino potencia a ser instalada características que regirán al conjunto de molino en su totalidad.

COMPONENTES ESPECÍFICOS DE DISEÑO: características de cada uno de los componentes que conforman la maquinaria en su conjunto y que a su vez poseen características por separado, dimensiones relacionada a las de componente de diseño y que también poseen características individuales.

CAPITULO IV: la evaluación de los resultados obtenidos en el Capítulo III se realizarán mediante la simulación contemplada dentro del diseño asistido por computadora CAD en el software SolidWorks programa que nos permitirá evaluar el comportamiento de las piezas a ser dimensionadas para el presente proyecto.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.2.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

La implementación de maquinaria para la etapa de molienda en la industria minera es fundamental motivo por el cual de desarrollarse de manera equivocada generara que la planta en su conjunto pierda eficiencia, motivo por el cual se presenta la importación de los mismos como una alternativa viable generándose así sobre costos por la misma, de manera análoga también se tiene presente la fabricación de dichas maquinarias por industrias locales, las mismas que de manera empírica desarrolla la implementación de dichas maquinarias.

Esto debido a que no se ha desarrollado investigación con respecto al dimensionamiento correcto, selección de materiales y cálculos adecuados para la fabricación optima de maquinaria correspondiente a la etapa de molienda. Dentro del proceso de molienda se determina que la maquinaria con mayor requerimiento de disponibilidad, eficiencia y durabilidad es la presente en molienda fina o molienda previa a la flotación, proceso que por lo general está

conformado por molinos semiautogeno es decir molinos que hacen uso de accesorios de molienda (bolas o barras), la más usada en la actualidad es el molino de bolas, equipo seleccionado para el desarrollo del presente proyecto.

En la región puno la fabricación de maquinarias, como son molino de bolas no tienen el interés necesario para su diseño y fabricación a pesar de que en nuestra región la minería es una de las principales actividades económicas.

Es en cuanto a esta necesidad la injerencia de viabilidad para el desarrollo del presente proyecto, así mismo es necesario que se deba de implementar el presente diseño acorde a características de equipos de actual utilización e implementación en las plantas mineras en desarrollo en la actualidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

Teniendo en cuenta la necesidad formulada en el punto anterior se determina que la mejor manera de poder contribuir a la solución es poder brindarles a los fabricantes un diseño optimo, en el cual se les detalle características como dimensiones, tipo de material de cada uno de los componentes, características de fabricación de los mismos, componentes a ser necesarios para ser adquiridos por la complejidad que refleja la implementación de los mismos.

Se propone la obtención de los parámetros de las características de manera matemática y posteriormente ser analizadas mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) el mismo que nos permitirá determinar si las características obtenidas a manera de cálculo, son factibles de implementación o fabricación.

Para un mejor desarrollo del presente proyecto se determina realizarlo de acuerdo a un protocolo el cual nos permita tener en cuenta las etapas necesarias para poder lograr un diseño óptimo para la posterior fabricación del mismo.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener un protocolo de diseño de molino semiautogeno, considerando la implementación de un accionamiento sin engranajes, aplicando la utilización de cálculos matemáticos y posteriormente ser corroborados mediante la implementación de simulación con software de diseño asistido por computadora.

1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.

- Obtener cálculos matemáticos que nos permita determinar las características físicas y de funcionamiento correspondientes al diseño de un molino semiautogeno.
- Realizar la simulación de los datos obtenidos con la finalidad de validarlos para su implementación.
- Obtener planos correspondientes a los componentes presentes para la implementación de un molino semiautogeno.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1.1 INVESTIGACION EN MOLIENDA.

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, nos describe el desarrollo de la molienda de la siguiente manera: Por más de un siglo los fenómenos de reducción de tamaño se han abordado a través de la energía consumida por los equipos de trituración y molienda (p. 49).

Dentro de las principales observaciones realizadas durante ese tiempo se pueden destacar las siguientes.

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, nos explica que, Beke, 1694, determina que el consumo de la energía en el rompimiento del mineral no sobrepasa 0.6%. con independencia de la diferencia en los resultados de ambos, (...) se considera que la energía necesaria para el rompimiento de la partícula del mineral es sumamente pequeña (p. 49).

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, nos explica que, Austin, 1964, establece que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera 3% de toda la energía consumida por el molino (p. 49).

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, precisa que, Las primeras investigaciones acerca de la presente temática corresponden a Rittinger, 1867 y Kick, 1883, ambas se enfocaron en un mejor entendimiento de los fenómenos producidos en la molienda, los mismos que

enfocaron a explicarlo desde la relación energía – reducción de tamaño, debido a esto a la reducción de tamaño se estudió como función del área de la superficie de la partícula nuevamente formada, el volumen de material molido y el diámetro (p. 50).

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, nos explica que, Lynch, 1977, determina que los experimentos han demostrado que el proceso de reducción de tamaño, la energía consumida por unidad de masa es proporcional a las pequeñas variaciones de tamaño de las partículas y que la energía requerida para lograr dichas variaciones es inversamente proporcional a una función dada del tamaño inicial del mineral (p. 50).

La industria desde entonces fue midiendo el consumo específico de energía durante décadas, pero realmente no sabía cómo hacer predicciones confiables para poder iniciar con la construcción de las maquinarias sin la incertidumbre de si las estimaciones fueran correctas.

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, nos detalla que, Fred Bond trabajo en la empresa de equipos de procesamiento de minerales Allis Chalmers durante la segunda mitad del siglo XX. Al tener acceso a uno de los laboratorios de molienda mejor equipados del mundo, y acceso a cientos de datos de plantas operativas en toda América del Norte. Su empleador Allis Chalmers, fue uno de los mayores proveedores de equipos de molienda. Allis Chalmers tenía un gran interés en la venta de equipos de molienda del tamaño “correcto”, por lo que se sintieron motivados a realizar investigaciones para poder realizar investigaciones para encontrar mejores formas de ampliar los resultados de molienda a

molinos de tamaño completo acorde con las necesidades de cada uno de los procesos para los cuales se les realizaba el estudio.

Lo que Bond desarrolló fue una fórmula simple que expresaba el consumo específico de energía con tres parámetros (p. 1).

Coello Velazquez A. L. y Tinojov O. N. - Artículo de Minería y Geología – 2001, nos detalla que, Bond, 1960 expone los tres principios básicos de su teoría planeando el modelo siguiente (p. 50).

$$E = K \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (2.1)$$

(2.1)

Donde:

- K Toma el valor de $10W_i$
- W_i Índice de trabajo (Work Index)

Estos modelos son las expresiones matemáticas conocidas como las leyes de trituración.

Montufar C.E.D.J. USCG - 2013, en su tesis “Optimización de la relación de bolas, para la molienda de piedra caliza mediante un molino de uso experimental” menciona lo siguiente, Para alcanzar los resultados requeridos, se inició determinando la carga óptima de bolas, variando de 30%, 35%, 40%, 45% a 50%, la carga de bolas respecto del volumen total del molino. De las cinco corridas realizadas, el 45% y 50% del volumen total del molino ocupado por bolas y la intensidad de sonido de efecto de caída en cascada presentado fueron

mínimos; el sonido correspondía a un rodamiento de las bolas dentro del molino; con el 35% y 40%, la intensidad de sonido de efecto de caída en cascada presentado fue intenso, pero aún se escuchaban pequeños rodamientos en el molino; el 30% presentó con mayor intensidad el efecto de caída en cascada, siendo este el indicado para el diseño experimental. La cantidad de material a utilizar para el diseño experimental, se determinó variando de 70%, 72%, 74%, 76% a 78%, la carga de material, respecto del volumen disponible entre bolas. Siguiendo el mismo principio utilizado para encontrar la carga de bolas, se determinó que el porcentaje del volumen total disponible entre bolas, ocupado por el material, correspondió al 70%; siendo este el que presentó mayor intensidad de efecto de caída en cascada (p.53).

Rivera I. Quintero F. Bustamante O. y Loaiza G. – Ingeniería y Ciencia – 2014, mencionan que, Un modelo de balance poblacional para un molino de bolas en la industria del cemento puede ser usado para planear y controlar la operación de los molinos en relación a la recarga de cuerpos moledores y consumos de acero. Además, el modelo se puede usar en combinación con un simulador de la molienda para optimizar la eficiencia energética y la productividad (p. 175).

2.1.2 SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO SIN ENGRANAJES.

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan. En la industria de procesamiento de minerales, el uso de sistemas de accionamiento de cicloconvertidor sin engranajes grandes para SAG-Mills se ha vuelto cada vez más común en los últimos años. Las clasificaciones de potencia muy altas con excelente rendimiento dinámico y alta eficiencia en un amplio rango de velocidad

permiten una optimización avanzada del proceso. El diseño de estos sistemas de accionamiento de fresado de gran tamaño requiere modernas herramientas de simulación para verificar el comportamiento del sistema. Un diseño optimizado debe tener en cuenta la interacción mecatrónica entre todos los componentes mecánicos y eléctricos individuales. Los métodos de cálculo y los objetivos de diseño relacionados deben definirse en una etapa muy temprana del proyecto para permitir la ingeniería simultánea (p. 1).

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, Al comienzo de las unidades sin engranajes (Gearless Drives) a finales de los 60, los componentes individuales se diseñaron casi de manera independiente. Solo se intercambiaba información de interfaz muy primaria entre los proveedores de los componentes, como fuerzas de cimentación bajo cargas operativas y condiciones defectuosas, constantes de resorte mecánicas y magnéticas, principalmente solo como información de una vía. En ese momento, solo se fabricaban tubos de molino pequeños y también las fuerzas magnéticas eran menores en comparación con las grandes plantas de alta potencia actuales. Los cálculos del diseño mecánico se basaron en casos de carga estática en términos de fuerzas y cargas de aceleración. Los modelos de simulación eran muy toscos debido a las capacidades rudimentarias de la computadora que estaban disponibles en este momento. Además, el pre y el post procesamiento de los programas de simulación no permitieron la creación de modelos detallados. Se utilizaron principalmente modelos 2D-FE o modelos de cáscara asimétrica con carga de Fourier (p. 2).

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, A finales de los 70, los molinos más grandes se fabricaron para molienda en húmedo, los datos de la base se calcularon con mucho más detalle y se intercambiaron con el fabricante de la fábrica y los ingenieros civiles, y permitieron la optimización iterativa de los sistemas de molino. Las complejidades de la ingeniería aumentaron porque la unidad gearless ya no podía diseñarse según los principios de tensión solamente, sino que también incorporaba principios de rigidez. Los criterios de rigidez deben ser definidos e intercambiados entre el proveedor del motor, el fabricante de la fábrica y el contratista de obras civiles. En este momento, todos los cálculos se basaban principalmente en suposiciones estáticas lineales (p. 2).

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo “A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units” mencionan que, A mediados de los 80, se diseñaron incluso molinos más grandes (32 pies / 36 pies) con potencias nominales de 12,000 kW o más y, por lo tanto, el diámetro y la longitud activa del motor eléctrico también aumentan. Con el aumento del tamaño de las unidades, el comportamiento dinámico de la fábrica y su sistema de accionamiento se hizo cada vez más importante para evitar que el variador fuera sometido a amplificaciones de resonancia inadmisibles. Además, los estándares revisados para el diseño sísmico, como el Código Uniforme de Construcción (UBC, por sus siglas en inglés) de EE. UU., Requirieron cálculos detallados del espectro de respuesta dinámica. Los primeros pasos para un modelo de sistema 3D general se hicieron para examinar la respuesta sísmica dinámica de la unidad de molienda SAG completa, incluyendo cimentación,

molino y cojinete, así como el motor eléctrico. El análisis también fue intercambiado, revisado y discutido con especialistas independientes (p. 2).

2.2 SUSTENTO TEÓRICO.

2.2.1 MOLTURACIÓN INDUSTRIAL (MOLIENDA)

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 8 Molienda, menciona que, La molienda es el último escalón de la fragmentación (La fragmentación es la reducción de un bloque a trozos menores, rompiendo la cohesión molecular en algunas partes, marcando líneas de rotura, y produciendo bloques de menor tamaño). industrial, sigue a la trituración normalmente, y se caracteriza por el tamaño de salida de los productos que puede estar entre algunos mm y algunas μm (p. 1).

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 8 Molienda, menciona que, Se persigue, normalmente, la liberación de unas especies mineralógicas con otras hasta aquel tamaño que permita una concentración diferenciada o bien llegar al tamaño de grano exigido por el método posterior de utilización del producto obtenido (p. 1).

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 8 Molienda, menciona que, Se realiza mediante equipos denominados molinos y estos pueden trabajar en seco o en húmedo. La diferencia entre ambos medios se suele caracterizar por una humedad en torno al 8% (este valor produce en los productos una cierta adherencia y marca un límite en la tendencia del comportamiento dentro de los equipos de molienda). Por debajo se considera humedad superficial y el trabajo de los equipos es en seco, siendo deseable que esta humedad no rebase el 3%-4% (p. 1).

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capitulo 8 Molienda, menciona que, El trabajo en húmedo se caracteriza por unos rangos de humedad elevados, del 40% al 70% de agua en volumen lo que representa para la mayoría de los minerales unos valores de S/P (relación de sólidos en peso) entre 55% y 80% (p. 1).

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capitulo 8 Molienda, menciona que, Para una humedad entre el 5% y el 10% se produce una pasta pegajosa y el rendimiento decae de forma importante y para valores mayores, ya un trabajo en húmedo, se recupera un valor de rendimiento útil y que se mantiene hasta que la dilución es tan elevada (Sp inferior al 50%) que se impide o dificulta el choque de las bolas con los granos (Una humedad excesiva lava los granos y la onda de choque que precede a la bola aparta los granos si la viscosidad no es la adecuada) (p. 1).

Se diferencia en la tabla las denominaciones correspondientes a proceso, etapa y escalón

Tabla N°2. 1: Escalones de la fragmentación.

Proceso	Etapa	Escalón	Humedad	Tipo de equipo
Fragmentación (Reducción de un bloque a tamaños menores)	Trituración (Etapa de la fragm. para tamaños gruesos)	Primaria Secundaria Terciaria	Seco o Húmedo	Trituradoras (Mandíbulas, conos, rodillos, martillos, etc.)
	Molienda (Etapa de la fragm. para tamaños finos)	Gruesa Media Fina Ultrafina	Seco o Húmedo	Molinos (Barras, bolas, SAG, autógenos y de guijarros)

Fuente: Emilio Andrea Blanco. Molienda. Open Course Ware Universidad de Cantabria.

2.2.2 FUERZAS DOMINANTES EN LA TRITURACIÓN O MOLIENDA

A fin de tener en consideración el equipo y la función del mismo la utilización de las fuerzas preferentes en cada uno de los procesos determinan las características de la máquina.

Debido a la variedad de materiales y sustancias con las que se realizan los trabajos de fragmentación se realiza una clasificación teniendo en cuenta lo siguiente:

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capitulo 8 Molienda, menciona que, Los materiales y las sustancias a fragmentar se caracterizan para esta función, entre otras, mediante las propiedades siguientes:

Molturabilidad: Aptitud o facilidad para la fragmentación, normalmente relacionada con la energía necesaria o con la dificultad para su fragmentación.

Abrasividad: Carácter más o menos agresivo en cuanto al desgaste de los equipos y de los materiales entre si (abrasión o atricción). Se mide, normalmente, por el contenido en sílice (SiO_2).

Pegajosidad: Cualidad de adherencia entre los materiales, que es función, normalmente, de la humedad y que se identifica también como pastosidad. No tiene relación directa con la viscosidad ya que esta última es una cualidad mensurable mediante ensayos normalizados y la pegajosidad es un concepto indicándose normalmente que aumenta o disminuye o afecta más o menos al proceso.

Las fuerzas que participan, normalmente, en un proceso de fragmentación son:

- Compresión.
- Cizallamiento.
- Percusión o impacto.
- Abrasión o atricción.

Según el predominio de una fuerza u otra en el equipo se considera:

Compresión: Esta se puede aplicar de forma discontinua o de forma continua y así se tienen los equipos.

Compresión discontinua: Cada bloque se ve sometido a compresión varias veces. Se utilizan máquinas como las trituradoras de mandíbulas, trituradoras giratorias y cono triturador. Este tipo de maquinaria es de carácter universal (se puede utilizar con cualquier mineral). Tienen relaciones de reducción (R_r) comprendidas entre 4 y 10.

Compresión continua: El bloque sufre una única compresión variando la intensidad. Se utilizan trituradoras o molinos de cilindros o de rodillos. Se utilizan para el tratamiento de minerales poco abrasivos y no muy duros como el carbón. Tiene relaciones de reducción entre 4 y 6.

Choque impacto o percusión: Cada bloque recibe una energía elevada de forma brusca (choque). Se utilizan las trituradoras de impactos, de martillos y de caída libre o cascada. En general no son aptas para materiales muy abrasivos y su relación de reducción es muy elevada, de 40 a 50.

Choque: Esta componente adquiere importancia en los molinos cuando estos trabajan a velocidades altas, próximas a la velocidad crítica, y las bolas describen trayectorias parabólicas yendo a golpear en la zona del pie de carga, ver figura en apartados siguientes, correspondiente a zonas en el interior de un molino, (esta zona es donde el molino recibe la alimentación).

Flexión: La fuerza que predomina es la flexión y el cizallamiento con un efecto de desgarro y generalmente acompañado por una compresión adicional. Se utilizan trituradoras de cilindros dentados o acanalados, trituradores de cilindro y placa. Son adecuados para materiales tenaces, pero poco abrasivos. La relación de reducción está entre 4 y 6 o entre 4 y 10 según tipo de equipo.

Mixto: El conjunto de fuerzas predominante es una mezcla de compresión, fricción e impacto. Se utilizan molinos de barras, bolas, SAG autógenos y de guijarros. La relación de reducción es muy elevada, puede alcanzar valores de 60 ó 90, incluso superiores, y depende de la configuración de la instalación en circuito abierto o cerrado (esta última más generalizada por la economía de energía que representa a igualdad de condiciones del proceso mineralúrgico).

Cada etapa o escalón se puede configurar como un sistema que trabaje en circuito abierto o en circuito cerrado, generalizándose el trabajo en circuito cerrado en las etapas de molienda y en las últimas de la fragmentación y en circuito abierto en las primeras etapas de fragmentación.

2.2.3. SISTEMAS GENERALES DE LAS INSTALACIONES Y EQUIPOS

Los equipos de fragmentación tienen mecanismos o técnicas para hacer frente a los problemas inherentes al efecto de fragmentar, dentro de estas necesidades se puede indicar los siguientes:

Sistema o técnica anti desgaste. Los productos y la operación a realizar obligan al contacto entre materia y equipo, más la necesidad de aplicar fuerzas de contacto. Esto produce un efecto mayor o menor de desgaste según la cualidad abrasiva del material, en el equipo, y es función de la característica del material y del tipo de proceso. Los elementos para disminuir este efecto, protecciones recambiables normalmente, se denominan sistema anti desgaste y se caracteriza por su disposición, resistencia y facilidad para ser restituido o cambiado en una operación de mantenimiento.

Sistema de regulación de la granulometría. Las instalaciones deben ser capaces de dar un producto de salida que tenga ciertas variaciones y tener cierta capacidad de adaptarse a diferentes alimentaciones dando un producto de salida determinado, disponer de mecanismos de regulación de la granulometría en función de parámetros manejables por el operador.

Sistema o mecanismo anti-intriturables. Estos sistemas deben garantizar la integridad del equipo ante elementos intriturables (constituidos normalmente por piezas metálicas procedentes de roturas o procedentes del frente como barrenas, tornillos, etc.) o del transporte. Además de poner medios de identificación y retirada de intriturables como imanes u otros, los equipos que representan fuertes inversiones (son caros) y donde las paradas constituyen pérdidas en reparación y por lucro cesante o pérdida de producción, deben tener en su diseño sistemas para paliar o evitar los efectos de la entrada no

deseada de in-triturables a la máquina. En general, todos los equipos de trituración y molienda disponen de los sistemas anteriormente mencionados.

Anti desgaste, Regulación, Anti triturables.

Sistemas o barreras de seguridad. Disposición de elementos de protección para evitar caídas, atrapamientos, y en general accidentes por el acceso no previsto o deseado a partes móviles del equipo. son máquinas de velocidad lenta por lo que se genera en su entorno una falsa sensación de control (p. 1,2).

2.2.4 ZONAS INTERIORES DE UN MOLINO DURANTE EL FUNCIONAMIENTO

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 8 Molienda, menciona que, Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su eje y en su interior existe una mezcla del material a moler junto con cuerpos molidores. Según sea la característica de estos cuerpos molidores, cilindros metálicos (barras metálicas con una longitud muy superior al diámetro), bolas metálicas o de fundición, trozos gruesos del propio mineral a moler, compuestos de sílice o mezcla de componentes, así se puede denominar el molino.

La acción principal en el interior de un molino es la abrasión o atrición que se produce porque al girar el cilindro, la masa que está en su interior se desplaza sobre si misma produciendo un gran roce entre las partículas y de estas con los elementos molidores. No es despreciable el efecto de impacto, función de la velocidad de rotación, de los cuerpos cuando son lanzados o por su caída en cascada o catarata por el efecto de giro y desplazamiento de masas.

En general para producir partículas finas prepondera el efecto abrasivo y para tamaños mayores, el impacto empieza a tener relevancia, en función del tamaño de los cuerpos moledores.

Los molinos pueden trabajar de forma discontinua, cerrando el equipo y haciéndolo girar por un tiempo determinado para después vaciar el contenido y separar el material molido de los cuerpos molturadores (bolas, guijarros, etc.), pero en minería y canteras el trabajo es, de forma general, en continuo. Esta forma de trabajo, en continuo, hace que la granulometría producida siga un proceso estadístico donde el tiempo de residencia dentro del molino afecta a la granulometría.

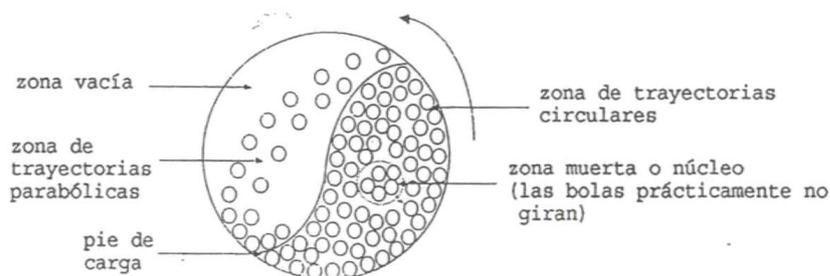
El cilindro gira sobre ejes o extremos huecos. Por el lado de la alimentación, y a través del espacio hueco del eje, se introduce el material a moler, agua si hay que ajustar el contenido de sólidos en peso o volumen, y la reposición de los cuerpos moledores y por el otro extremo (según el tipo de vertido: de rebose, lateral, central, otro) se produce una salida continua de material molido, normalmente arrastrado por una corriente de agua (molienda en húmedo) o de aire (molienda en seco).

El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado por lo que la variación del caudal es una forma de regulación granulométrica y de adaptación del molino a necesidades cambiantes.

Dentro de un molino, tanto de barras como de bolas, se pueden definir diferentes zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación que son dos elementos fundamentales en la operación de molienda. Junto con las anteriores variables, adquiere una importancia relevante el grado de humedad

del material a moler que condiciona el tipo de molienda y los resultados de la misma (p. 3,4).

Figura N°2. 1: Zonas del interior de un molino.



Fuente: Andrea Blanco E. Molienda. Open Course Ware Universidad de Cantabria

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 8 Molienda, menciona que, El núcleo representa una zona de nula o baja actividad de molienda, y, por el contrario, el pie de carga corresponde a la zona más activa del molino, la de mayor capacidad de fragmentación. El esquema muestra las bolas (cuerpos molidores) de diámetro uniforme cuando en la realidad del interior de un molino en funcionamiento los diámetros muestran toda una gama de dimensiones, desde el menor posible, hasta el nominal que se introduce en la reposición. (p. 4).

2.2.5 CIRCUITOS DE FRAGMENTACIÓN

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capítulo 4 Circuitos de Fragmentación, menciona que, La fragmentación es la tecnología mineralurgia que consiste en la reducción de tamaño, reducción a fragmentos (Parte o porción pequeña de algunas cosas quebradas o partidas), de los minerales y rocas que forman el todo-uno procedente de mina o cantera y que alimenta a los talleres de preparación, clasificación y concentración.

Mediante la reducción de tamaño se persigue adecuar el mismo a las necesidades de uso con dos objetivos básicos:

La adecuación a los tamaños exigidos en el mercado, ejemplo de las gravas de construcción, y su clasificación según estándares de tamaño normalizado; 0-20; 20-40, < 40, etc.

La liberación del mineral, entendiendo por tal el aumento de la ley individual de las partículas en el fragmentado, por un lado, y la acumulación de partículas o fragmentos de menor ley y de ganga por otros, para posteriormente, y mediante un proceso de concentración, separar aquellas de ley superior a un criterio, de aquellas otras que no alcanzan este valor y de la ganga.

La fragmentación se divide en dos grandes bloques en base a la tecnología utilizada, trituradoras y molinos. Para las primeras, trituradoras, se consideran habitualmente tres escalones (En canteras se utiliza, a veces, una clasificación en cuatro escalones de trituración, que se corresponden formalmente, por los tamaños manejados, a dos escalones de trituración más dos de molienda, gruesa y media), 1º, 2º y 3º, y la molienda se divide en gruesa, media, fina y micronización.

Los circuitos de fragmentación son combinaciones de equipos, básicamente un clasificador (CL) y un fragmentador (F) a los que se introduce la alimentación (A) y se descarga el producto (P). El producto, salvo excepciones como el caso del circuito abierto tipo (F), no coincide con el fragmentado (B) (p. 1).

Se clasifican en dos grandes grupos:

2.2.5.1 CIRCUITOS ABIERTOS.

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capitulo 4 Circuitos de Fragmentación, menciona que, Se caracterizan por una alimentación directa y una salida y están formados por un fragmentador sólo o un fragmentador y un clasificador con un funcionamiento sin recirculación.

Fragmentador: El circuito abierto más sencillo se caracteriza por la alimentación (A) directa a un fragmentador, y la descarga del fragmentado (B) tal como sale de la máquina. El esquema responde al principio siguiente: Se emplea en trituración primaria y pocas veces en secundaria, las características principales son:

- Diseño sencillo.
- La regulación del circuito es la que brinda el equipo.
- Adaptación difícil a los cambios de proceso o de alimentación.
- Diseño poco elástico.
- Funcionamiento robusto.

Figura N°2. 2: Circuito abierto.

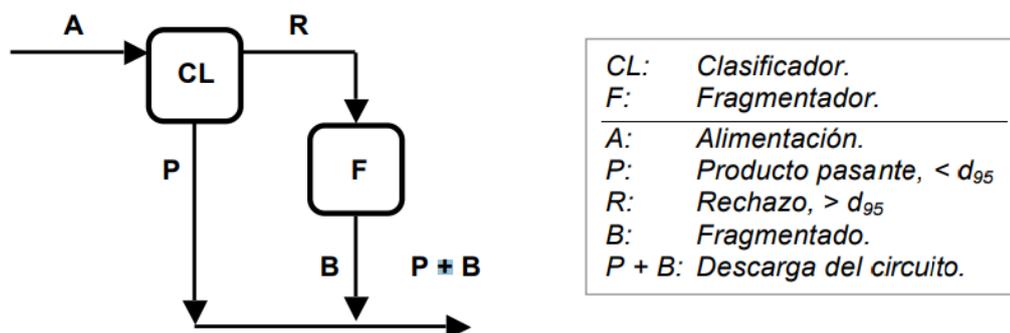


Fuente: (Andrea Blanco E. Circuitos de fragmentación. Open Course Ware

Universidad de Cantabria)

Clasificador–fragmentador: Una mejora sobre el circuito anterior consiste en añadir un aparato previo de clasificación donde separamos ya el producto que es menor que el d_{95} , y que juntamos directamente con el producto que sale del fragmentador. El producto mayor de d_{95} pasa por el aparato de fragmentación y es reducido de tamaño. El esquema responde al principio siguiente:

Figura N°2. 3: Circuito abierto clasificador fragmentador.



Fuente: Emilio Andrea Blanco. Circuitos de fragmentación. Open Course Ware

Universidad de Cantabria

Las características son similares al circuito anterior con las ventajas sobre éste, entre otras, que se enumeran a continuación. Se tiene en cuenta que el coste del fragmentador, máquina robusta, es mayor que el correspondiente al clasificador.

Se ahorra energía. Existe una fracción de la alimentación que no es necesario fragmentar, de hecho, no pasa por el equipo fragmentador.

- A igualdad de máquina fragmentadora, elemento caro del sistema, se aumenta la capacidad del sistema.
- Se disminuye la abrasión. A igualdad de tratamiento, el desgaste del fragmentador es menor debido a que sólo una parte de la alimentación

pasa por el fragmentador. El desgaste, en alguna manera, es proporcional a la cantidad de material que es tratado en cada equipo.

- Se reduce la sobre fragmentación. Este efecto produce más finos y por tanto nos daría más gasto de energía, en consecuencia, mayor trabajo del fragmentador y mayor desgaste.
- Ambos circuitos tienen el inconveniente de que no existe un control del producto de salida, es el que corresponde a un equipo fragmentador que evidentemente no está diseñados para esta función, aunque existe para cada máquina una curva característica de los productos (p. 1,2).

2.2.5.2 CIRCUITOS CERRADOS

Andrea Blanco E. - Universidad de Cantabria – Capitulo 4 Circuitos de Fragmentación, menciona que, La característica básica de los circuitos cerrados es la existencia de un flujo de material entre el clasificador y el fragmentador, que circula a través de ellos en un circuito de ida y retorno, un sistema de circulación interno cerrado, produciendo una carga circulante entre ambos equipos.

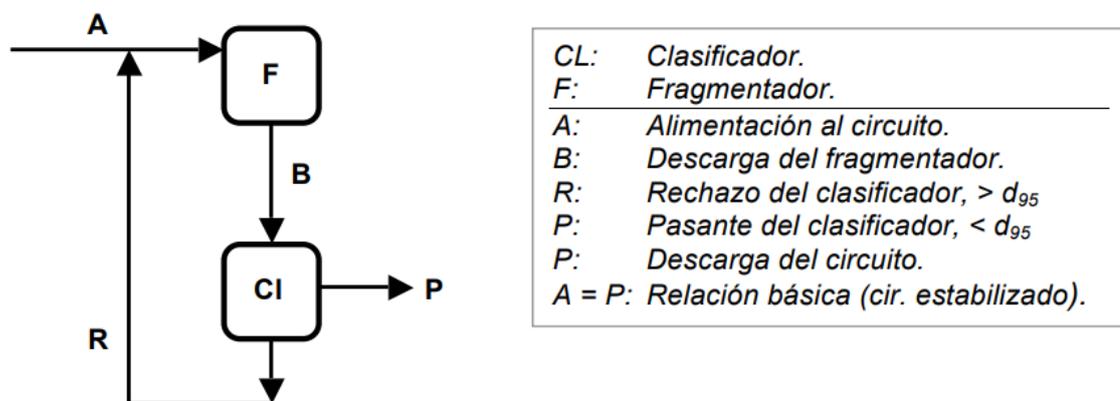
Estos circuitos pueden ser de dos tipos según la posición relativa del clasificador y del fragmentador y responden a los esquemas que se dan a continuación. Se emplean de forma generalizada en molienda y en algunas ocasiones en trituración.

Los clasificadores utilizados pueden ser de tipo cribas, hidro clasificadores, ciclones, etc. y en general cualquiera de los equipos que realizan un corte por tamaño, y los fragmentadores pueden ser trituradoras de cono, molinos de barras, bolas, martillos, trómeles, etc., y en general, como en el caso anterior de

los clasificadores, cualquiera de los equipos que realizan la operación de trituración o de molienda.

Fragmentador-clasificador: La alimentación va a un equipo de fragmentación (F) y el producto resultante (B) alimenta un clasificador (CL). La salida del clasificador, mayor que el tamaño de salida, vuelve al fragmentador mezclado con la alimentación, y el pasante en el clasificador, menor que el tamaño de salida, forma el producto de salida (P) del circuito. Este tipo de circuito se usa en molienda y es de menor uso en trituración. La alimentación a los circuitos de molienda, normalmente, ya tiene un cierto control del tamaño porque suele proceder de un equipo de trituración.

Figura N°2. 4: Circuito cerrado fragmentador clasificador.



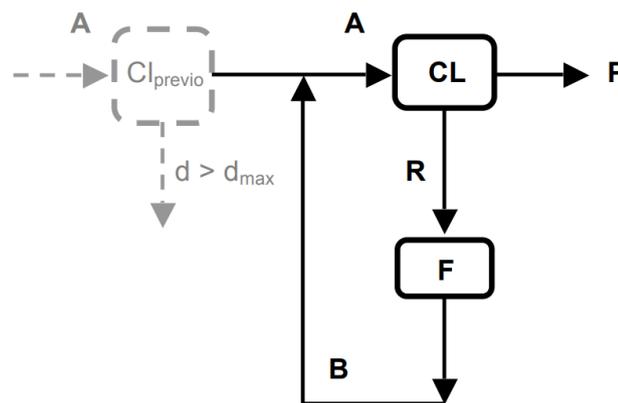
Fuente: Emilio Andrea Blanco. Circuitos de fragmentación. Open Course Ware

Universidad de Cantabria

Clasificador-fragmentador: La alimentación va a un equipo de clasificación (CL). El rechazo (R) del clasificador, mayor que el tamaño de salida, pasa por el fragmentador (F) y el pasante del clasificador, menor que el tamaño de salida, es el producto resultante (P), constituye la salida del circuito, y va directamente a concentración. La salida del fragmentador (B) va en su totalidad al clasificador. El clasificador, en el caso de trituradores, debe estar protegido contra elementos

excesivamente grandes en tamaño ya que se pueden dañar las mallas de las cribas. Esta instalación de protección no es necesaria en los circuitos de molienda donde el rango de tamaños está más controlado; son alimentados normalmente desde una etapa de trituración o de molienda anterior. Con la nomenclatura usada anteriormente, el esquema es como sigue (p.2,3)

Figura N°2. 5: Circuito cerrado clasificador fragmentador.



Fuente: Emilio Andrea Blanco. Circuitos de fragmentación. Open Course Ware
Universidad de Cantabria

2.2.6 CALCULOS DE DISEÑO DE MOLINO SEMIAUTOGENO

La determinación de las características a las cuales se encontrará regida la maquinaria en diseño está determinada por el entorno de trabajo en vista que estas determinaran las características iniciales y finales requeridas, estas características varían en todas las zonas de implementación haciendo que los cálculos y características de los equipos sean similares mas no iguales por la peculiaridad de cada uno de los casos.

2.2.6.1 DETERMINACIÓN DE LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN

Las diferentes plantas de tratamiento de minerales presentes en nuestro país, permiten la observación de diversas situaciones de trabajo de los molinos de bolas.

Presentándose situaciones en las que el mineral circula de manera directa o recircula con la finalidad de poder aprovechar la fragmentación al máximo el material antes de ser derivado a los procesos posteriores (flotación), en la cual al concebirse pulpa de un tamaño no procesable generaría pérdidas y por consiguiente una menor eficiencia de la maquinaria utilizada en el proceso.

La mejor manera de poder satisfacer las características requeridas por la planta es tener presente los parámetros para los cuales se requiere la maquinaria en diseño.

2.2.6.2 DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

las características de diseño estarán determinadas por los equipos previos a la maquinaria en diseño las cuales nos otorgaran características de ingreso y que luego del proceso para el cual se diseñara la presente maquinaria deberá de satisfacer las condiciones con las cuales deberá de trabajar el proceso posterior, determinándose así la eficiencia de la misma.

2.2.6.3 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES INICIALES DE DISEÑO

La determinación de dimensiones iniciales de diseño nos permiten tener una aproximación de las dimensiones reales utilizadas, la determinación de dimensiones iniciales mediante cálculos matemáticos nos permite tener un menor costo en la realización de escalaciones en laboratorio que se aplicaban

con anterioridad, actualmente es imposible conseguir una similitud entre una maquinaria industrial (fabricada y en servicio) y una de laboratorio (sistema piloto) lo cual significaría un encarecimiento en la etapa de diseño de las mismas, se han desarrollado durante décadas métodos matemáticos que permitan realizar la aproximación al diseño final entre las más utilizadas y versátiles tenemos los siguientes métodos.

- Métodos basados en índices de trabajo de bond.
- Métodos australianos basados en pruebas de peso
- Métodos de diseño spi/sag.

Las metodologías basadas en pruebas de peso y método de diseño spi/sag requieren de pruebas de laboratorio y un conjunto de ecuaciones utilizadas para la potencia del molino y las predicciones de rendimiento. Este conjunto de metodologías tiene como objetivo la obtención de la energía específica de molienda requerida para reducir una roca de tamaño " F_{80} " a un tamaño menor " P_{80} ".

La energía específica de molienda requerida para la reducción (" F_{80} " a un tamaño menor " P_{80} ") estará expresada de la siguiente manera.

$$\frac{kW \times H}{tonelada}$$

Donde:

- kW Energía de molienda requerida "en la carcasa del molino"
- H/ton Inversa del rendimiento

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, nos detalla que, Este requerimiento de energía correspondiente a la reducción de un “ F_{80} ” a un “ P_{80} ” es una propiedad determinada por la roca, y cualquier diferencia en energía específica de diferentes dispositivos de trituración es un reflejo de la variación en la eficiencia de los dispositivos de trituración (p. 1)

Optaremos por realizar los cálculos mediante la aplicación de método de índices de trabajo de bond, debido que es la que más se acomoda de acuerdo a los datos obtenidos correspondientes a la zona de implementación del presente proyecto, así mismo es el de mayor aceptación debido a las ventajas que presenta durante su aplicación.

2.2.6.4 METODOLOGIA DE CALCULO BASADO EN ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND.

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, menciona que, Antes de la década de 1950 la industria de la molienda no tenía la capacidad de ampliar los resultados de molienda de laboratorio a diseño de tamaño industrial, o estimar de manera fiable la variación de la energía cuando varía el tamaño del producto.

Fred bond trabajo en la empresa de equipos de procesamiento de minerales Allis Chalmers en la segunda mitad del siglo XX la formula desarrollada por bond es aquella que de manera simple expresa el consumo específico de energía con tres parámetros: el tamaño de alimentación, el tamaño del producto y la medición de molienda del mineral. Expresada en la siguiente formula (p. 1,2)

$$E = 10 * Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- E Consumo específico de energía KWh/tonelada
- W_i Índice de trabajo sin unidades (aplicable a cálculos métricos)
- F_{80} Es el 80% del tamaño de alimentación
- P_{80} Es el 80% del tamaño del producto

Debido a que la naturaleza de la rotura de la roca cambia de acuerdo al tamaño. La fractura de la roca gruesa estará determinada por las fracturas presentes en la misma, mientras que en las rocas de tamaño mediano deberá de afectarse la matriz de la roca para poder así fraccionarse, y las rocas de tamaño fino se rompen a lo largo de los granos de minerales presentes en las mismas, para poder adaptarse a estos comportamientos en el método de bond se hace uso de tres características establecidas para para cada una de la rotura en particular estableciéndose rangos para los respectivos testeos.

Tabla N°2. 2: Rangos de tamaño típico índice de trabajo de bond.

ÍNDICES	TAMAÑO DE ALIMENTACIÓN	TAMAÑO DEL PRODUCTO
ÍNDICE DE TRABAJO DE TRITURACIÓN, W_{ic}	100 mm	10 mm
ÍNDICE DE TRABAJO DE MOLINO DE BARILLAS, W_{iRM}	10 mm	2100 μ m
ÍNDICE DE TRABAJO DE MOLINO DE BOLAS, W_{iBM}	2100 μ m	100 μ m

Fuente: The Design and Installation of Comminution Circuits C. Rowland

2.2.6.4.1. DETERMINACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA ESPECÍFICO DEL CIRCUITO GLOBAL.

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, menciona que, Chet Rowland trabajo sobre las ecuaciones planteadas por bond descubriendo y planteando la utilización de algunos ajustes en ciertas aplicaciones donde las maquinas operaban fuera de su rango de mayor eficiencia estos factores se encuentran en tablas en algunos textos y no todos los consideran para cálculos particulares. De interés para estilo de cálculo son los factores de Rowland EF4 y EF5 para la molienda de bolas, las siguientes ecuaciones son para valores de índice de trabajo métrico y tamaños de partículas en μm (p. 3)

$$EF4_{BM} = \left[1 + \frac{(0.907 * Wi_{BM} - 7)}{\left(\frac{F_{80}}{P_{80}}\right)} \left(\frac{F_{80}}{4000 * \left(\frac{14.33}{Wi_{RM}}\right)^{0.5}} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

$$EF5_{BM} = \left[\frac{P_{80} + 10.3}{1.145 * P_{80}} \right] \quad (2.4)$$

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, menciona que, Teniéndose en cuenta las características establecidas en la tabla de contrastación tabla n°1 F_{80} es de 10,000 μm considerándose el diseño de un molino de bolas de una sola etapa de la tabla n°1, el P_{80} es el producto del sistema de molino de bolas el factor $EF5_{BM}$ solo se aplica por debajo de 75 μm y un valor de 1 se puede asumir por encima de ese valor de acuerdo a lo detallado por C. Rowland en “The Design and Installation of Comminution Circuits”

La combinación de los factores de eficiencia de C. Rowland en la ecuación de bond, entiéndase la aplicación de tres veces de la ecuación n°1 en conjunción

con la ecuación n°2 y n°3 brinda la ecuación de energía específica desde el tamaño del producto de la trituradora primaria F_{80} hasta un tamaño de producto de desbordamiento de ciclón de molino de bolas P_{80} (p. 4)

$$\begin{aligned}
 E = & 10 \times Wi_c \left(\frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \\
 & + \left[10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{2100}} - \frac{1}{\sqrt{10000}} \right) \right. \\
 & \left. + 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{2100}} \right) \times EF5_{BM} \right] \times EF4_{BM} \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

Esta última ecuación determina la energía de trituración en “máxima eficiencia” que se observaría en máquinas de trituración altamente eficientes, típicamente en molinos de trituración de múltiples etapas, fresado de varillas y molino de bolas o un molino de etapas múltiples o un molino de una sola etapa debe de ser siempre un 10 % menos eficiente por lo cual se determina.

$$E_{total} = 1.10 \times E \quad (2.6)$$

2.2.6.4.2. PARTICIONAR LA ENERGÍA TOTAL DEL PROCESO.

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, menciona a, Barratt D.J. – 1989 - An Update On Testing, Scale-up and Sizing Equipment for Autogenous and Semi- Autogenous Grinding Circuits. SAG Conference, menciona que, El método basado en bond y aplicado por Barratt implica deducir un consumo de energía del consumo de energía específico del molino SAG, ESAG, del consumo total de energía específico del circuito de molienda. El consumo específico de energía

para molino SAG se puede estimar utilizando la fórmula de Barrat que se publicó en la conferencia SAG de 1989 (p. 4)

$$E_{SAG} = \left[10 \times Wi_C \left(\frac{1}{\sqrt{P_C}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) + 10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{P_R}} - \frac{1}{\sqrt{P_C}} \right) \times EF4_{RM} + \right. \\ \left. 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{P_R}} \right) \times EF4_{BM} \times EF5 \right] \times 1.25 - 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{T_{80}}} \right) \times \\ EF4_{BM} \times EF5 \quad (2.7)$$

Determinándose:

$$E_{total} = E_{BM} + E_{SAG} \quad (2.8)$$

2.2.6.4.3. DETERMINAR EL TAMAÑO DEL MOLINO Y POTENCIA DEL MOTOR.

Doll A. G. Technical Memorandum – 2015, menciona que, Conocer el consumo de energía específica del molino sag y del molino de bolas nos permite calcular los tamaños de los molinos si se conoce una tasa de rendimiento deseada. (...) La potencia en los cálculos de bond es la potencia vista por el mineral en el caparazón del molino esto se denomina frecuentemente potencia en el piñón debido a que los molinos más pequeños utilizan una suerte de piñón engranaje para transmitir la potencia del motor al molino. Un engranaje y un piñón poseen pérdidas mecánicas, lo que conlleva que la potencia real otorgada por el motor sea mucho mayor que los cálculos que se fundamentan en función a la potencia en el piñón. El motor del molino de bolas se puede dimensionar considerando que si se realiza el uso de engranajes se deberá definir por criterios de eficiencia piñón engranaje la cual se recomienda en una constante de 0.985

y la potencia nominal del molino de bolas en 0.94 quedando la ecuación de la siguiente manera (p. 5)

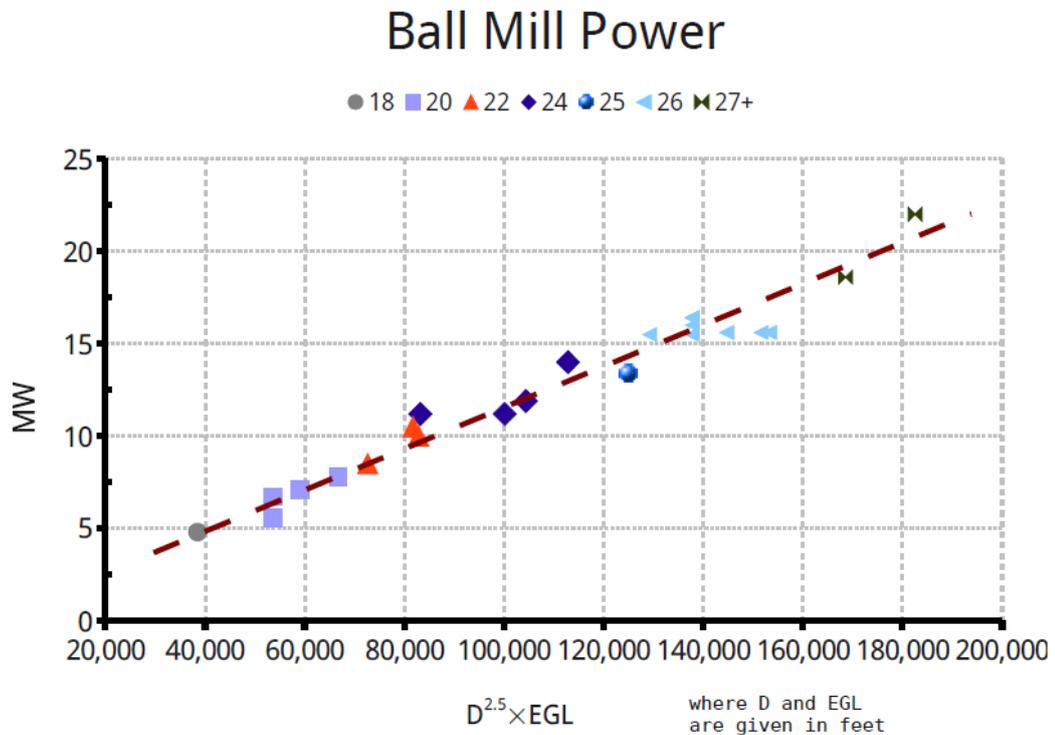
$$POT EN M. DE BOLAS = (E_{BM} \times ton/hora) \div 0.985 \div 0.94 \quad (2.9)$$

Por tratarse del diseño de un molino de bolas con tecnología sin engranajes se asumirá la eficiencia piñón engranaje en 1.000 (para gearless) quedando constante la potencia nominal del molino de bolas quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$POT EN M. DE BOLAS (GEARLESS) = \left(E_{BM} \times \frac{ton}{hora} \right) \div 1.000 \div 0.94 \quad (2.10)$$

Una vez obtenida la potencia necesaria para la operación del molino de bolas se procederá a determinar las dimensiones dentro de la tabla n°2 dentro de la cual se encuentran equipos similares.

Figura N°2. 6: Relación potencia del motor, diámetro y longitud efectiva.



Fuente: Alex G Doll, Consulting Ltd - Sag Mill + Ball Mill Circuit Sizing

De la gráfica se determinará que tanto el diámetro como la longitud de la maquinaria en diseño, también podemos determinar que dichos parámetros son directamente proporcionales a la potencia necesaria a ser instalada para el procesamiento del mineral a ser tratado con la maquinaria diseñada.

2.2.6.5. CALCULO DE CRITERIOS DE OPERACIÓN.

La operación del molino estará basada en la rotación del mismo a una velocidad específica, esta rotación es soportada por los “trunnions” (muñones), la misma es proporcionada por un accionamiento sin engranajes GMD (Gearless Mill Driver) (accionamiento de molino sin engranajes).

Durante la operación del molino y debido a la rotación una porción de la carga del molino es arrastrada por la sección perimetral debido a la rotación, para posteriormente por no contar con suficiente inercia para mantenerse pegada al perímetro del molino la misma cae y habiéndose deslizado una parte de carga ambas generan entre si el desgaste por abrasión y por impacto respectivamente.

Estas diferentes características del proceso están regidas por parámetros, estos últimos nos proporcionan datos de manera precisa que nos permitirán determinar las dimensiones a considerar para la determinación del diseño final.

2.2.6.5.1. ALTURA DE CARGA

También denominada grado de llenado, es decir la proporción del volumen interno ocupada por la carga, conjunto de mena a moler y elementos molturadores, este factor afecta directamente al rendimiento del molino.

Debido a que afecta a la potencia consumida por el molino observándose injerencia a partir de 50 al 55% anulando totalmente cuando el molino se encuentra con un grado de llenado de 100%.

A partir de 50% del grado de llenado, el excedente del mismo genera una masa de oposición al movimiento y una cantidad de masa mayor en el eje de simetría, llegando a ser nula la molienda al llegar al 100% de grado de llenado esto coincide con lo investigado por BIREBENT.

El grado de llenado habitualmente en la práctica se comprende entre el 40% al 55% habitualmente el más óptimo es 45% y está conformado por elementos molturadores y el propio mineral a moler. La altura estará determinada por la siguiente ecuación.

$$H_B = \frac{d}{2}(1 - \cos\theta) \quad (2.11)$$

Donde:

- d Diámetro interno del molino.
- θ Ángulo típico para molino de bolas.

2.2.6.5.2. VOLUMEN DE CARGA.

El presente parámetro se encuentra directamente relacionado con la altura de carga parámetro que antecede al presente esto debido a que ya determina la altura correspondiente a ser implementada esta altura estará compuesta por un volumen de rocas mineralizadas y otro de materiales molturadores.

El porcentaje de volumen del molino ocupado por el material (roca mineralizada) en función del volumen de rocas mineralizadas y materiales molturadores estará determinada por.

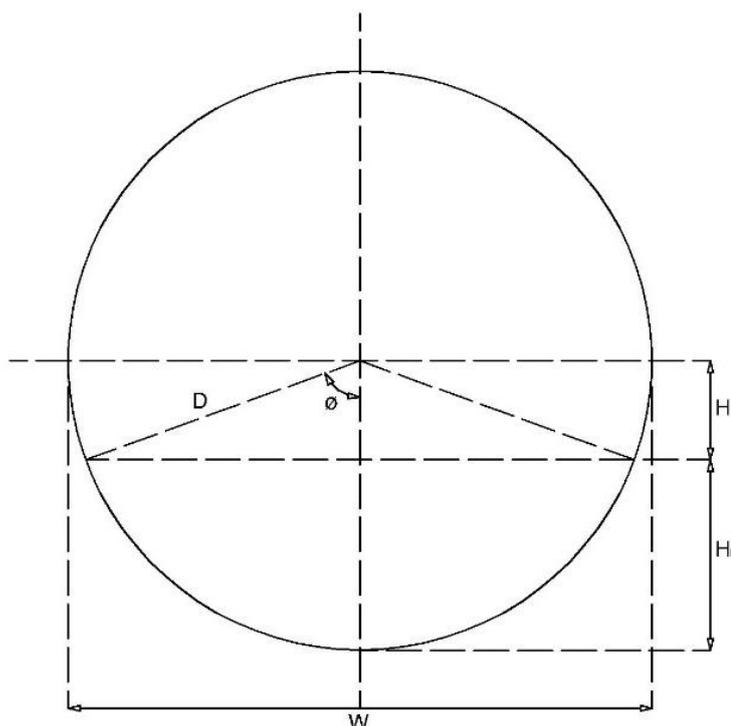
$$V_R = \frac{\text{Volumen Mineral}}{\text{Volumen Molino}} \times 100 \quad (2.12)$$

El porcentaje del molino ocupado por bolas estará determinado por.

$$V_R = \frac{\text{Volumen Bolas}}{\text{Volumen Molino}} \times 100 \quad (2.13)$$

De acuerdo a lo observado en equipos similares en funcionamiento el porcentaje de uso de elementos molturadores corresponde al 40% del volumen de carga, de la figura 07.se determinan los siguientes parámetros.

Figura N°2. 7: Parámetros de medición de profundidad de carga.



Fuente: Barrios Saira M. G. – Optimización De Los Sistemas De Control De Un
Molino De Bolas - UNSA

2.2.6.5.3. DIMENSIONES DE ELEMENTOS MOLTURADORES INICIALES.

Para el dimensionamiento de elementos molturadores se deberá de tener en cuenta que estos varían de acuerdo si han de ser las bolas de inicio de operación ya sea después de una parada de planta o al inicio de operaciones de la maquinaria, o de remplazo durante la operación de la misma.

El tamaño de bolas inicial está relacionado con el máximo tamaño de alimentación según la siguiente ecuación.

$$d_B = 0.4 \times K \times \sqrt{F} \quad (2.14)$$

Donde:

- F Tamaño de alimentación en centímetros.
- d_B Diámetro de la bola en centímetros.
- K Factor de Molienda (constante).

El presente factor depende de importantes variables de operación, de entre las cuales se identifican para operación las siguientes: índice de trabajo, tamaño de la partícula más grande y gradiente de tamaño de estas, gravedad específica de los sólidos y densidad de la pulpa. Así como de factores correspondiente a dimensiones del molino como: diámetro, velocidad de rotación

Considerando estas variables se tiene que el máximo diámetro de bolas inicial puede estimarse de acuerdo a lo siguiente en milímetros (mm).

$$d_B = 25.4 \left[\left(\frac{F_{80}}{k} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_s W_i}{100 \phi_c (3.281D)^{0.5}} \right)^{0.33} \right] \quad (2.15)$$

Donde:

- D Diámetro interno del molino en metros.
- K factor de molienda ver tabla n°3
- F_{80} tamaño superado por el 80% de las partículas.
- W_i índice de trabajo.
- ϕ_c fracción de velocidad crítica del molino.

Los valores correspondientes a la variable “k” se encuentran tabulados de la siguiente manera.

Tabla N°2. 3: Valores de factor de molino.

TIPO DE MOLINO	TIPO DE RECTIFICADO	TIPO DE CIRCUITO	K
SOBRE FLUJO	HÚMEDO	ABIERTO	350
SOBRE FLUJO	HÚMEDO	CERRADO	350
DIAFRAGMA	HÚMEDO	ABIERTO	330
DIAFRAGMA	HÚMEDO	CERRADO	330
DIAFRAGMA	SECO	ABIERTO	335
DIAFRAGMA	SECO	CERRADO	335

Fuente: Alex G Doll, Consulting Ltd - Sag Mill + Ball Mill Circuit Sizing

2.2.6.5.4. DIMENSIONES DE ELEMENTOS MOLTURADORES DE REEMPLAZO.

Durante la operación del molino los elementos molturadores presentan desgaste y por consiguiente disminuyen de tamaño y de masa, esto implica que

se deberá de tener de manera programada el remplazo de las mismas, para mantener condiciones óptimas de molienda.

El desgaste de los elementos molturadores está directamente relacionado a: naturaleza abrasiva de la roca, desgaste de elementos molturadores por choque entre sí, velocidad de rotación, gravedad específica del mineral, índice de trabajo del mineral.

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, Existen ecuaciones que miden la pérdida de masa de los elementos molturadores en función de la energía entregada al molino, para el caso del material la pulpa se tiene lo siguiente (p. 19)

$$\frac{kg}{kWh} = 0.16(A_i - 0.015)^{0.33} \quad (2.16)$$

Donde:

- A_i índice de abrasión.

De igual manera se puede establecer en función a las ecuaciones anteriormente postuladas la siguiente ecuación para calcular las dimensiones de elementos molturadores de remplazo.

$$d_{BR} = \frac{6.3(F_{80})^{0.29}(W_i)^{0.4}}{(vD)^{0.25}} \quad (2.17)$$

Donde:

- v velocidad de rotación del molino.

El desgaste de los elementos molturadores (bolas) es un factor importante durante la operación del molino, este fenómeno se ve afectado de manera directa por la velocidad del molino, diámetro del molino, gravedad específica del mineral, índice de trabajo del mineral, tipo de elementos de blindaje, la dureza específica de los elementos molturadores, el pH de la pulpa entre otros. El desgaste en elementos molturadores puede llegar a ser entre 400 gr a 1200 gr por tonelada de material procesado.

2.2.6.5.5. DENSIDAD DE LOS ELEMENTOS MOLTURADORES.

Para poder considerar un eficiente comportamiento de los elementos molturadores a comparación con el material a ser procesado tanto la densidad como la dureza de los elementos molturadores deberá de ser considerablemente mayor. Por la condición anterior es necesario usar una densidad adecuada para la fabricación de los elementos molturadores, la misma que deberá de ser acorde con los materiales a ser procesados, es importante destacar que la densidad correspondiente a una densidad referencial de los elementos molturadores en un espacio determinado y por ningún motivo hace referencia a la densidad del material de las bolas.

La siguiente ecuación relaciona la densidad de elementos molturadores con la densidad del material a ser reducido.

$$\rho_B = (0.016 \times \rho_M^2 + 20 \times \rho_M)^{0.5} - 0.4 \times \rho_M \quad (2.18)$$

Donde:

- ρ_B Densidad de los elementos molturadores.
- ρ_M Densidad del material a ser procesado.

La densidad de los elementos molturadores suele estar entre los siguientes valores:

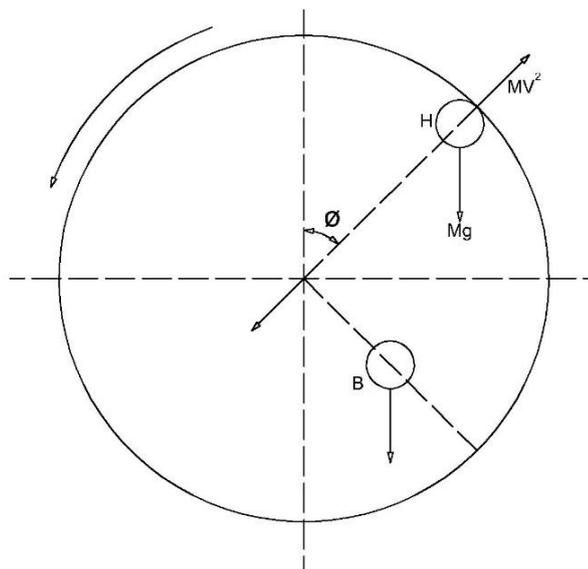
- Acero fundido: 4.3-4.8 tn/m³
- Acero forjado: 4.6-4.8 tn/m³

2.2.6.5.6. ROTACIÓN DEL MOLINO Y VELOCIDAD CRITICA

La rotación del molino inicia desde estar detenida hasta alcanzar una velocidad crítica de igual manera la molienda interna incrementa conforme se incrementa la velocidad, una vez sobre pasada la velocidad crítica de funcionamiento la carga junto a los elementos molturadores tienden a girar conjuntamente con la carcasa del molino generando que la molienda interna sea nula, y la potencia requerida para el giro del molino reduce drásticamente, la velocidad a la que ocurre lo anterior se conoce como velocidad crítica.

A continuación, se muestra un diagrama de cuerpo libre correspondiente a los elementos molturadores presentes dentro del molino.

Figura N°2. 8: Diagrama de cuerpo libre de elementos molturadores.



Fuente: Barrios Saira M. G. – Optimización De Los Sistemas De Control De Un
Molino De Bolas - UNSA

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, En la posición H el elemento molturador (bola) es mantenido en contacto con el blindaje con una fuerza MV^2 , asumiendo que existen condiciones de equilibrio y por consiguiente no ocurre deslizamiento entre el elemento molturador y el blindaje.

La posición B indica el centro de gravedad de toda la carga con una distribución de fuerzas similar al punto A asumiendo esta vez factores como las fuerzas de roce. A fin de poder determinar de manera matemática se considera es sistema A, la componente centrípeta de la fuerza debido a la gravedad de la siguiente manera, $Mg \times \cos \phi$, igual a la componente centrífuga de la fuerza, $MV^2/(R - r)$ (p. 21)

$$\cos \phi = \frac{V^2}{(R - r) \times g} \quad (2.19)$$

Donde:

- M Masa del elemento molturador (bola).
- g Aceleración de la gravedad.
- V Velocidad línea del elemento molturador (bola).
- R Radio del molino.
- r Radio de elemento molturador (bola).

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, La fuerza de gravedad máxima ocurre cuando $\phi = 1$, teniendo esta consideración en cuenta se obtiene la expresión que nos permitirá definir la velocidad crítica en función al diámetro del molino y el diámetro de los elementos molturadores (bolas) considerándose ambos parámetros en metros (p. 22)

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{(D - d)}} \text{ rpm} \quad (2.20)$$

Donde:

- V_c Velocidad crítica del molino.
- D Diámetro del molino.
- d Diámetro de elemento molturador (bola).

Uno de los parámetros a considerarse durante el funcionamiento es el roce entre los elementos molturadores (bolas) y el blindaje, la misma que podemos expresarla de la siguiente manera.

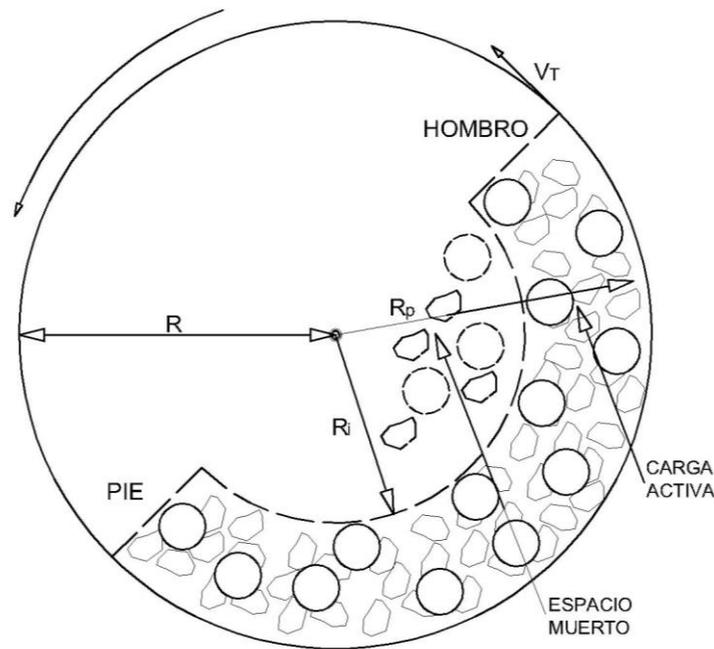
$$\mu = \left(\frac{V_c}{v} \right) \quad (2.21)$$

Donde:

- V_c Velocidad crítica del molino.
- μ Coeficiente de fricción o roce.
- v Velocidad de rotación del molino

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, En la siguiente grafica se representa las fuerzas de roce presentes en el perfil de distribución de carga como en la posición B de la figura anterior, es decir se considera la variación de velocidad de las partículas entre el centro y la periferia del molino (p. 22)

Figura N°2. 9: Diagrama de movimiento de carga dentro del molino.



Fuente: Elaboración Propia

De la figura anterior se define la siguiente ecuación:

$$\omega_p = \left[\frac{V_N R (R_p - \zeta R_i)}{R_p (R - \zeta R_i)} \right] \quad (2.22)$$

Donde:

- ω_p Velocidad de rotación de una partícula a una distancia R_p .
- V_N Velocidad tangencial normalizada $V_N = (V_R/V_T)$.
- V_R, V_T Velocidad tangencial en posición R_p y en la periferia.
- R_p Distancia radial de la partícula p localizada en la zona activa.
- R_i Distancia radial del radio interior de la región activa del molino.
- ζ Función de llenado volumétrico

La función de llenado volumétrico puede definirse de la siguiente manera.

$$\log \zeta = 0.4532 \times \log(1 - J_B) \quad (2.23)$$

De la ecuación N°22 puede observarse que a medida que J_B se aproxima al volumen total, la velocidad de la partícula se acerca a la velocidad tangencia V_N .

2.2.6.5.7. POTENCIA DEL MOLINO

La potencia de operación del molino se puede determinar, a partir de considerar una situación de operación normal del molino, esto se daría de cumplirse que la potencia necesaria para mantener el centro de gravedad de la carga a 60° con respecto a la vertical, operando a las RPM determinadas para el molino.

Masa procesada por el molino.

$$M_{PRO} = (\%_{VEM} \cdot \rho_{EM} + (1 - \%_{VEM}) \cdot \rho_{MN}) \cdot V_{PRO} \quad (2.24)$$

Donde:

- M_{PRO} Masa procesada en el molino.
- $\%_{VEM}$ Porcentaje de volumen ocupado por elementos molturadores.
- ρ_{EM} Densidad de los elementos molturadores.
- ρ_{MN} Densidad del mineral.
- V_{PRO} Volumen total de material siendo procesado.

Distancia del eje de giro del molino al centro de masa.

$$L = \left(\frac{\Phi_{MOL}}{2} \right) - H_b + \frac{4H_b}{3\pi} \quad (2.25)$$

Donde:

- L Distancia centro de giro del molino – centro de gravedad del material procesado.
- ϕ_{MOL} Diámetro del molino.
- H_b Altura de la carga dentro del molino.

Velocidad de giro del molino.

$$\omega_{MOL} = \frac{12[RPM] \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (2.26)$$

Donde:

- RPM Revoluciones por minuto del molino.
- ω_{MOL} Velocidad de giro del molino.

De todos los datos obtenidos con anterioridad se obtiene.

$$P_{MOL} = M_{PRO} \cdot g \cdot \cos(90 - \alpha) \cdot \omega_{MOL} \cdot L \quad (2.27)$$

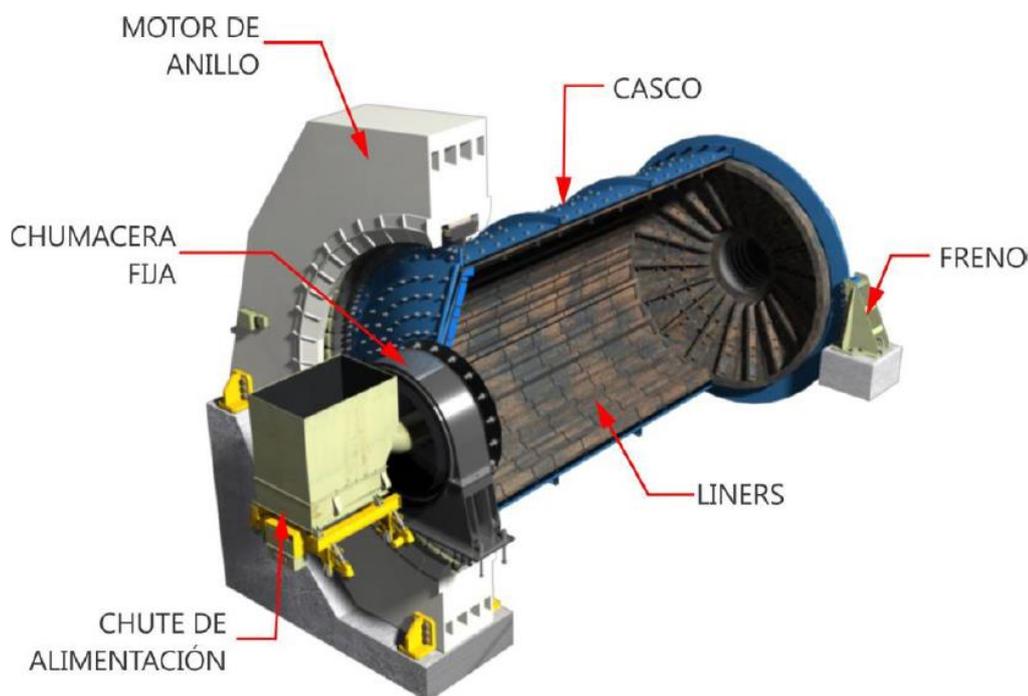
Donde:

- P_{MOL} Potencia del molino.

2.2.6.7. DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

La fragmentación de las partículas se consigue por medio de combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión. Estos procesos se llevan a cabo en el interior de equipos cilíndricos rotatorios de acero que se conocen como “molinos de rodamientos de carga” o simplemente “molinos”

Figura N°2. 10: Diagrama de implementación de molino de bolas.



Fuente: Manual De Operaciones – Concentración – Minera Las Bambas

2.2.6.7.1. SISTEMA DE DESCARGA.

El tiempo de permanencia del material dentro del molino depende fundamentalmente de características fundamentales de funcionamiento y dimensionamiento.

- Tamaño del molino.
- Velocidad de giro.
- Facilidad de desplazamiento de la pulpa.
- Tipo de flujo de trabajo.
- Tiempo medio de permanencia.

El nivel del tipo de descarga (alto, medio, central entre otros) afecta de manera directa el tiempo de permanencia del material por consiguiente la velocidad de paso por el molino y el tonelaje horario tratado, siendo aún más importante la calidad del material post-proceso.

Para limitar de acuerdo a las necesidades de tiempo medio de permanencia la misma que nos garantice la calidad del material de salida existen diversos tipos de sistemas de descarga.

Sistema de rebose "OVERFLOW" (rebose), este sistema se basa fundamentalmente en el recorrido que debe de realizar la carga desde el trunnion de carga hasta el trunnion de descarga, también se debe de tener presente que el trunnion de carga deberá de ser de menor dimensión que el trunnion de descarga para evitar el retorno de material, generando pérdidas durante el proceso. Según Alex Doll los equipos deberían de utilizarse para partículas menores de 0.30 mm

Sistema de descarga de rejilla o de diafragma, este sistema se basa fundamentalmente en la instalación de una rejilla o diafragma que antecede al trunnion de descarga, derivándose en la selección previa a la derivación por el trunnion de descarga. Según Alex Doll los equipos deberían de utilizarse para partículas de entre 0.30 mm hasta 0.45 mm

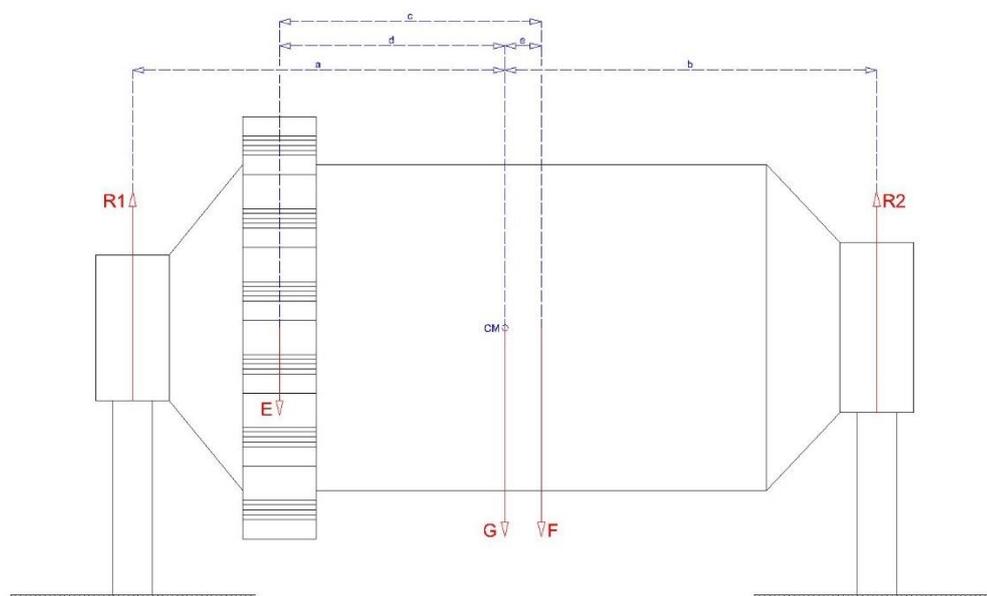
Sistema de descarga centro periférico, el presente sistema se basa en la realización de la carga a través de dos trunnion de carga derivándose a la descarga en compuertas céntricas ubicadas durante lo largo del perímetro en el centro del molino. Según Alex Doll los equipos deberían de utilizarse para partículas de entre mayores de 0.45 mm.

Dentro del diseño de elementos estructurales se deberá de identificar la forma general de la estructura a ser implementada, esto nos permitirá poder identificar que componentes son relevantes para el diseño.

para poder determinar se deberá de tener en consideración el peso del molino incluyendo el mineral y los elementos molturadores, se deberá de tener presente también la ubicación y los posibles errores durante el montaje de la misma, dentro de factores físicos que se deberán de considerar la inclinación correspondiente para la facilitación del flujo de molienda.

En términos generales se realiza el diagrama de cuerpo libre del molino en su conjunto.

Figura N°2. 11: Diagrama de cuerpo libre del molino.



Fuente: Elaboración Propia

Donde:

- G Peso total del molino considerando rotor de accionamiento.
- F Peso total del molino sin considerar rotor del accionamiento.
- E Peso del rotor del accionamiento.
- R1, R2 Reacciones sobre las fundaciones (descansos).

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, Se puede apreciar que la fuerza F representa el peso del molino sin considerar el componente del accionamiento, encontrándose esta fuerza en el eje de simetría del molino. Sin embargo, al considerar el rotor del accionamiento deja de contener al centro de masa desplazándose este en dirección hacia la zona de implementación de este determinado por una distancia “ e ”, consecuente de esto la carga ya no es determinada por la fuerza F si no que se representa por la fuerza G , ($G=F+E$) (p.27)

Realizando el análisis correspondiente a las reacciones en las fundaciones se puede obtener los valores correspondientes a las dimensiones de ubicación de las fuerzas interactuantes en el molino.

2.2.6.7.2. ESPESOR DE LA CARCASA

Para poder determinar de manera consistente el espesor de la carcasa se utilizan ecuaciones de resistencia de materiales.

Para lo cual se aplicarán ecuaciones de diseño de Von Misses, las cuales se traducen en un procedimiento determinado de la siguiente manera.

Se realizarán los cálculos correspondientes a esfuerzos de torsión y flexión debido a la acción del par del motor y al peso de la carga dentro del molino. Es importante mencionar que el par del accionamiento se considera constante y que la acción del momento flector también lo es, es decir, esfuerzo cíclico constante en el tiempo.

$$\text{Flexión} \quad \sigma_x = \frac{M_a \cdot C}{I} \quad (2.28)$$

$$\text{Torsión } \tau_{xy} = \frac{T_m \cdot C}{I} \quad (2.29)$$

Donde:

- M_a Momento flector.
- T_m Momento torsor.
- c Distancia al punto de cálculo.
- I, J Momentos de inercia y polar respectivamente.

Posteriormente se puede realizar el cálculo de esfuerzos de Von Misses.

Considerando despreciable el esfuerzo por corte se obtiene.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = 16 \frac{D}{\pi(D^4 - d^4)} \left(M_a \pm \sqrt{(M_a)^2 + (T_m)^2} \right) \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{S_y}{n}\right)^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (2.31)$$

Donde:

- n Factor de seguridad de diseño.
- S_y Resistencia a la fluencia del material

De lo anterior se desprende una ecuación de diseño para el diámetro.

$$\left(\frac{D^2 - d^2}{D}\right) = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi \cdot S_y}\right)^2 \cdot (4(M_a^2) + T_m^2) \quad (2.32)$$

2.2.6.7.3. ESPESOR DEL TRUNNION

Para el eje del molino, en el punto de cambio de sección de zona de alimentación a la zona carga, se utiliza las mismas ecuaciones anteriores solamente teniendo en consideración el cambiando los parámetros de ingreso.

2.2.6.7.4. BLINDAJES Y REVESTIMIENTOS.

Estos sistemas tienen una doble misión, proteger la carcasa (elemento resistente del molino), de las acciones de la molienda, golpes, desgaste, entre otros así mismo deberá de favorecer el movimiento de la carga dentro del molino. Para esta última característica de deberá de contar con revestimientos que deberán de cumplir la función de levantar la carga con la finalidad de que se genere movimiento uniforme.

Los elevadores son usados para promover la operación de la molienda al levantar las rocas y bolas con el fin de que caigan de cierta altura y se genere así una mejor reducción por impacto y por abrasión. El número de elevadores está determinado por la siguiente ecuación.

$$N^{\circ} \text{LEVANTADORES (ONDA DOBLE)} = 3.3 \times \pi \times D \quad (2.33)$$

$$N^{\circ} \text{LEVANTADORES (ONDA SIMPLE)} = 6.6 \times D \quad (2.34)$$

Donde:

- D Diámetro del molino en metros

Los levantadores están ubicados en la camisa del molino (estructura interna del molino que garantiza la protección de la estructura del molino al desgaste) así mismo cumple la función de base para los levantadores, las camisas pueden ser de distintos materiales como podrían ser acero al magnesio, níquel endurecido o aceros de alto carbono por ser un material que trabajara constantemente bajo impactos y propenso a desgaste por la circulación interna de otros componentes.

Las alturas de las ondas presentes en las camisas suelen estar en relación de 1.5 a 2 con respecto al espesor de esta. Por lo general para definir con cual tipo

de levantadores trataremos el presente proyecto debemos de tener presente lo siguiente.

- ONDA SIMPLE Uso de bolas de tamaño mayor a 60 mm
- ONDA DOBLE Uso de bolas de tamaño menor a 60 mm

2.2.6.7.5. MATERIAL DE LEVANTADORES, BLINDAJES Y

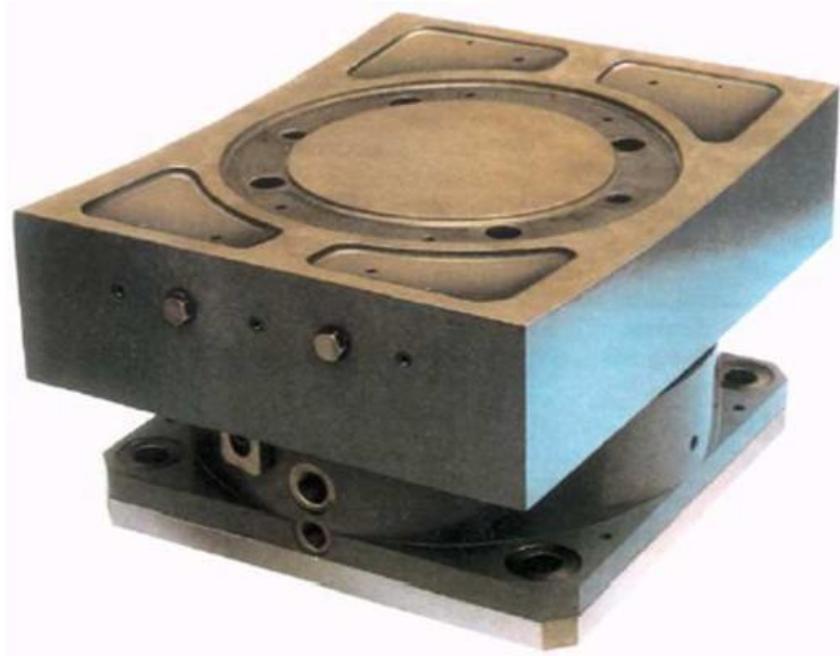
REVESTIMIENTOS.

Los materiales utilizados para la fabricación de levantadores y recubrimientos son: acero de alto carbono, acero al manganeso, níquel endurecido y caucho endurecido. Dada las condiciones de trabajo de los molinos se determina la aplicación de los materiales en los revestimientos y levantadores, también deberá de tenerse en cuenta aquellos que cuenten con un menor costo y que se puedan encontrar con facilidad en el mercado nacional, este recubrimiento interno se encontrará fijado mediante la aplicación de pernos forjados a fin de poder permitir el fácil remplazo de los mismos en vista que el desgaste interno no se realiza de manera uniforme. Lo cual implica el cambio de cada una de ellos previa evaluación de servicio.

2.2.6.8. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE SISTEMA DE DESCANSO.

Para dimensionar los descansos se deberá de considerar la función que estos cumplen. En la actualidad la aplicación de descansos hidrostáticos es de principal aplicación en equipos rotacionales de gran peso y que trabajan a su vez con grandes cargas. En estos casos el uso de rodamientos se ve limitado por las dimensiones de los equipos y magnitudes de las cargas. Es por ello que los “pads” (almohadillas) se presentan como una alternativa para solucionar el problema.

Figura N°2. 12: Almohadilla hidrostática.

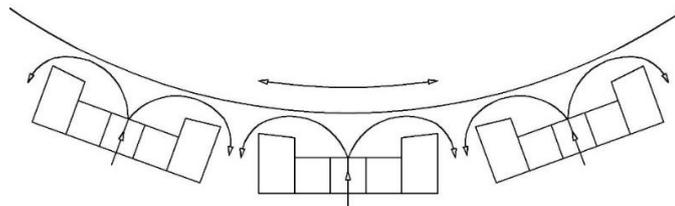


Fuente: (SKF hydrostatic shoe, 2017)

Barrios Saira M. G. 2015, nos menciona que, Dentro de este marco es importante mencionar el funcionamiento de los “pads”, estos se basan en un principio hidrostático. El aceite es inyectado en una cavidad que existe entre el Pad y el anillo conocido como “girth ring”. La presión provocada en el Pad hace que el anillo se levante hasta que se cree un espacio. Con lo anterior se puede generar una especie de flotación del eje en su descanso, haciendo que este pueda rotar con baja fricción a cualquier velocidad y en cualquier dirección (p.30)

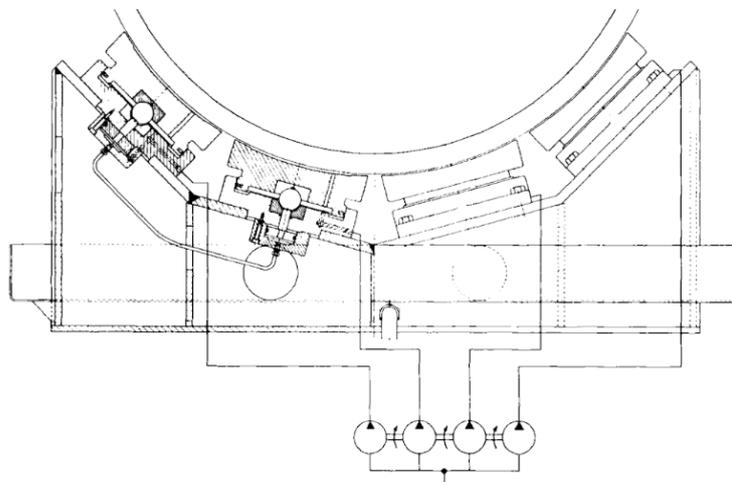
El espacio de presión depende de la presión generada por el aceite y el de la geometría del pad. En la siguiente figura se muestra el principio de funcionamiento de este.

Figura N°2. 13: Esquema de funcionamiento de pads.



Fuente: Elaboración Propia

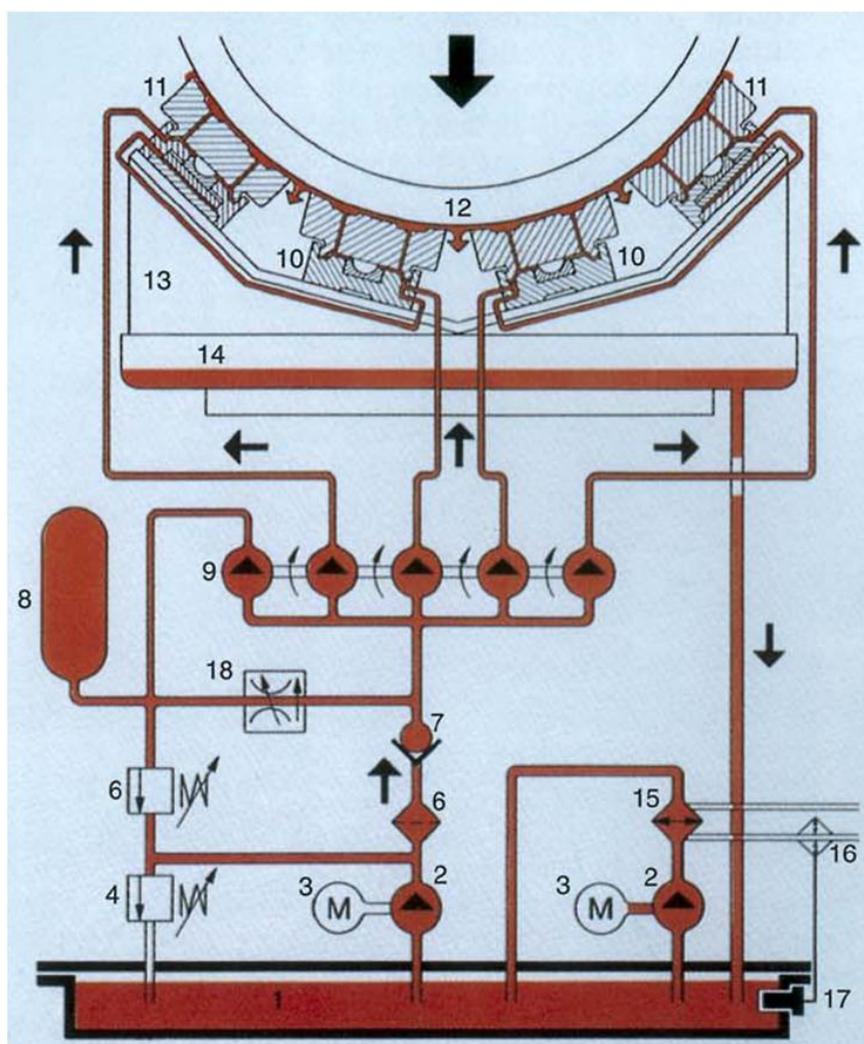
Figura N°2. 14: Esquema de instalación de pads.



Fuente: R. Bassani, B. Piccigallo – Hydrostatic Lubrication - Tribology Series, 22

Para contar con el principio hidrostático este deberá de depender del sistema hidráulico con bombas y válvulas correspondientes a cada uno de los pads es con el fin de controlar la presión que genera la inyección de aceite. Para la implementación de un sistema correspondiente a dicho sistema se muestra a continuación.

Figura N°2. 15: Esquema de sistema hidráulico.



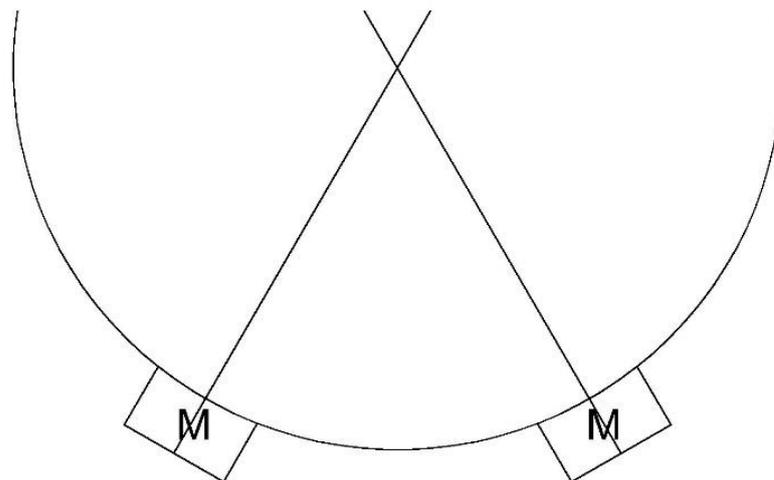
Fuente: Avraham Harnoy - Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and
Lubrication

1. Tanque de Aceite.
2. Bomba.
3. Motor Eléctrico.
4. Válvula de Alivio.
5. Acumulador.
6. Divisor de Flujo.
7. Pad Maestro.
8. Pad Esclavo.

9. Anillo.
10. Pedestal de Descanso.
11. Carter de Aceite.
12. Radiador de Aceite.
13. Válvula para Agua de Refrigeración.
14. Termostato.
15. Válvula de Control de Flujo.

Dentro de este marco se hace mención de pad's maestros y esclavos, esto se encuentra determinado por el tipo de implementación de estos, si bien dos pad's son suficientes para la mayoría de las aplicaciones (2 pad's por descanso) puede ser que las cargas radiales sean mayores y se añaden más descansos en función de los esclavos, es decir, funcionan en función a los demás descansos maestros, pero proporcionan mayor soporte al eje y permiten fabricar descansos más delgados. Los esquemas de montaje se muestran a continuación.

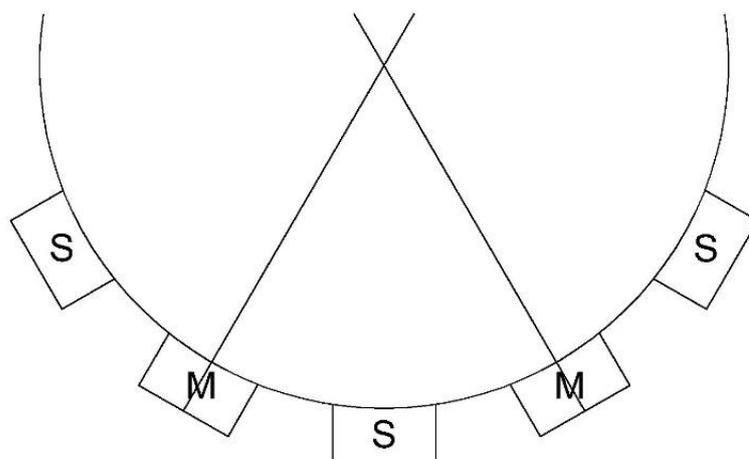
Figura N°2. 16: Posicionamiento de dos pads maestros.



Fuente: R. Bassani, B. Piccigallo – Hydrostatic Lubrication - Tribology Series, 22

Elaboración: Propia

Figura N°2. 17: Esquema de pads maestro – esclavo.



Fuente: R. Bassani, B. Piccigallo – Hydrostatic Lubrication - Tribology Series, 22

Elaboración: Propia

Entre las principales características de los descansos tienen la capacidad de auto alinearse a los errores de fabricación de los ejes o anillos o errores de montaje del sistema.

Los fabricantes indican que los descansos hidrostáticos son muy útiles en sistemas de molienda larga cuyas cargas radiales por descanso son de hasta 12 000 kN y como la mayor carga radial en los descansos de los molinos actualmente instalados no es mayor a 659 kN se tiene que este sistema es adecuado para las condiciones de operación requerida por equipos de este tipo.

Los materiales de fabricación de estos descansos suelen ser de acero fundido con granito esferoidal (fundición gris nodular) y acero. La pared de contacto del pad esta recubierta con bronce a modo de material de sacrificio para no dañar el material del eje ni el del pad.

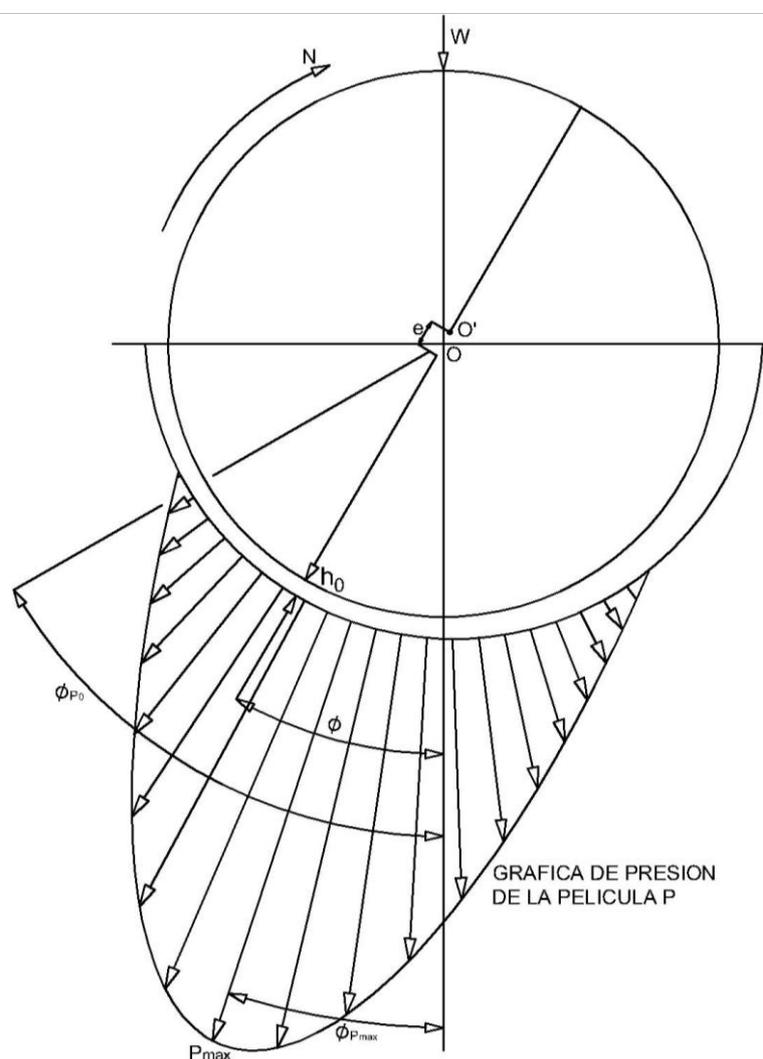
La existencia de pads de guía axial, las mismas que permiten amortiguar los movimientos y las vibraciones que se puedan producir en este sentido.

Como se muestra en el esquema del sistema hidráulico existe un anillo que permite que el sellado de la película de aceite, es por eso que la instalación del

sistema se debe realizar personal calificado y bajo condiciones establecidas por el fabricante a fin de poder garantizar el correcto funcionamiento de los descansos.

Dentro del marco del diseño de descansos un factor importante es la presión que se debe aplicar sobre la película de aceite para producir el efecto hidrodinámico. Se muestra el esquema que muestra la dinámica de rotación del eje sobre el descanso.

Figura N°2. 18: Esquema de eje en descanso - diagrama de presión.



Fuente: R. Bassani, B. Piccigallo – Hydrostatic Lubrication - Tribology Series, 22

Elaboración: Propia

Donde:

- N Velocidad de rotación del eje.
- W Carga radial a la cual es sometido el eje.
- O' Centro del descanso.
- O Centro del eje.
- e Excentricidad producto de la rotación con respecto al centro.
- h_0 Espesor de la película de aceite.
- P_{max} Presión máxima sobre la película de aceite.
- θ_{max} Angulo entre punto de presión máxima (estático- rotación).
- θ_{P0} Angulo donde se anula la presión (vertical – presión nula).

El perfil de distribución de presión tiene esta forma debido a la fuerza por área que ejerce el trunnion sobre la película de aceite y a la rotación de este, de hecho, por efecto de la rotación se tiene que el perfil esta inclinado en el mismo sentido de esta lo que indica que el trunnion no rota en el centro del descanso, este último se desplaza para uno de los lados.

En este sentido se tiene que este perfil parabólico de distribución de presión tiene la siguiente ecuación:

$$P_t = P_o \left(\frac{y}{c} \right)^{0.5} \quad (2.35)$$

Donde:

- P_o Máxima presión sobre el descanso en estado de reposo.
- c Juego de “Journal” con respecto a “Bearing”

De lo anterior se precisa que la parte interna del pad's se conoce como "Journal" y el cilindro que lo soporta como "Bearing".

Sin embargo, por simplicidad se calcula la presión que soporta de manera directa la superficie vinculada al pad mediante la siguiente ecuación.

$$P = \frac{W}{A} \quad (2.36)$$

Donde:

- W Carga radial a la que es sometido el eje.
- A Superficie de contacto del pad.

2.2.6.9. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE SISTEMA DE ACCIONAMIENTO

2.2.6.9.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL ACCIONAMIENTO.

MAQUINAS SÍNCRONAS

Las maquinas síncronas son maquinas cuyo estator se encuentra alimentado por corriente alterna, sin embargo, el rotor del mismo se encuentra alimentado por alimentación continúa realizándose esta mediante un enrollado de campo o bien mediante imanes permanentes.

En términos prácticos las maquinas síncronas tiene su mayor aplicación para aplicaciones de alta potencia, particularmente como generadores a bajas revoluciones. Cuando la maquina se encuentra conectada a la red la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de las variables eléctricas como son voltaje y corriente y del número de polos correspondiente al rotor, estas últimas características dan origen a su nombre ya que se dice que la maquina opera síncronamente con la red de alimentación.

Las maquinas síncronas son utilizadas como motores de alta potencia y de bajas revoluciones, motivo por el cual son ampliamente utilizados en la industria minera siendo implementados en molinos semiautogeno o como descortezadores en la industria maderera.

PARTES

ESTATOR:

La parte estática del motor, en la misma en la que se encuentra conformada el devanado trifásico de corriente alterna también denominado devanado inducido, circuito magnético formado por apilamiento de placas magnéticas.

El campo magnético presente en el estator de un motor síncrono gira con una velocidad constante, esta velocidad está vinculada de manera directa con la frecuencia de la tensión y el número de polos derivando en la siguiente expresión matemática.

EL BOBINADO EN EL ESTATOR:

Los motores son generalmente trifásicos y por consiguiente los devanados de los mismos también serán. Para diseñar el devanado, hay que tener en cuenta algunos factores importantes como son el número de polos y el número de ranuras presentes en el estator. Para diseñar un bobinado, está determinado de la siguiente manera.

$$q = \frac{N}{3 \cdot p} \quad (2.37)$$

Donde:

- q Numero de ranuras por fase.
- N Numero de ranuras general.
- p Numero de polos.

ROTOR:

La parte rotativa de un motor síncrono está conformado por un devanado de corriente continua, denominado también devanado de campo y un devanado en corto circuito, que impide el funcionamiento de la máquina a una velocidad diferente de la de sincronismo, al igual que en el estator el rotor está conformado por apilamiento de chapas magnéticas de menor espesor que la del estator.

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (2.38)$$

Donde:

- n Velocidad de sincronismo de la máquina.
- P Numero de pares de polos que posee la máquina
- f Frecuencia de la red de conexión de la máquina.
- p Numero de polos que posee la máquina.

Los rotores se encuentran diferenciados por las formas de implementación de los mismos, de acuerdo al siguiente detalle.

- Rotor de polos salientes : Gran número de polos, velocidades bajas.
- Rotor cilíndrico : De 2 a 4 polos, velocidades altas.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SINCRONO:

Al igual que la máquina de inducción el estator de la máquina síncrona se encuentra alimentado con corrientes alternas. Esto hace que se produzca un

campo magnético rotatorio el cual induce en los enrollados de estator una fuerza magnetomotriz dada por la ecuación.

$$F_e = \frac{3}{2} \cdot F_m \cdot \cos(\omega_{sinc}t - \theta) \quad (2.39)$$

Donde:

- F_e Fuerza magnetomotriz del estator.
- F_m Fuerza máxima equivalente.
- ω_{sinc} Velocidad sincrónica.
- θ Angulo de posición del entrehierro.

$$F_m = N \cdot I_{max} \quad (2.40)$$

Donde:

- F_m Fuerza máxima equivalente.
- N Numero de vueltas de las bobinas de estator.
- I_{max} Valor máximo de la corriente de alimentación.

La expresión anterior implica que el máximo de la fuerza magnetomotriz cuando este se encuentra a la misma velocidad sincrónica.

Esta velocidad sincrónica, corresponde a la frecuencia de la red cuando la maquina posee una determinada cantidad de polos.

En el caso del rotor de la maquina síncrona, este se encuentra alimentado por una corriente continua, lo cual hace que la fuerza magnetomotriz del rotor sea de magnitud constante y se encuentra fija, en estas condiciones, el campo

magnético del rotor tiende a alinearse con el campo magnético rotatorio de estator haciendo que el eje gire a la velocidad sincrónica.

La expresión del torque estará determinada de manera inicial por la potencia del motor y la velocidad angular que este posee. De acuerdo a la siguiente expresión.

$$T = \frac{Pot}{\omega_{\alpha}} \quad (2.41)$$

Donde:

- Pot Potencia del motor.
- ω_{α} Velocidad angular del motor.

2.2.6.9.2. ACCIONAMIENTOS SIN ENGRANAJES GEARLESS

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, Desde finales de los años sesenta, el desarrollo de autómatas, semiautogeno y molinos de bolas más grandes en las industrias de procesamiento de minerales y cemento se hizo ampliando el sistema de propulsión tradicional incorporando motores de baja velocidad, conduciendo molinos a través de un tren mecánico o piñón doble y engranaje de cincha. Esta solución alcanza sus límites económicos y de diseño con el aumento de los tamaños de disco. Actualmente, los molinos con hasta 32,000 kW. Además, la velocidad variable se ha vuelto más y más deseable para un control de proceso optimizado del concentrador.

Las principales ventajas de las unidades de cicloconvertidor en comparación con una unidad de engranaje convencional son:

- Clasificaciones de potencia muy altas.
- Bajo mantenimiento y alta confiabilidad.
- Amplio rango de velocidad con alta eficiencia para todos los puntos de operación.
- Excelente rendimiento dinámico y capacidad de carga de sobretensión.
- Baja corriente de arranque.
- Ninguna contribución a la corriente de cortocircuito.
- Sin conexión mecánica entre el motor y el molino.
- Rotación de reloj y antihorario del molino.

La principal área de aplicación de los accionamientos sin engranajes es el rango de alta potencia, donde se requiere un funcionamiento extremadamente suave, también a una velocidad mínima combinada con características de control sobresalientes para un proceso optimizado.

La unidad gearless de hoy es bien conocida en toda la industria minera. Después de más de 30 años, se ha instalado un amplio espectro de aplicaciones para Gearless Drives, que son capaces de manejar varios tipos de mineral y molino. El tiempo ha demostrado que todos los requisitos para los molinos pueden ser satisfechos por este concepto. En muchos casos, se han desarrollado soluciones innovadoras para proporcionar considerables beneficios para proyectos en todo el mundo (p.2)

2.2.6.9.3. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES.

Dr. Ing. Kümmlee H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, El molino SAG es el corazón del concentrador. Normalmente no hay redundancia

en la planta. Por lo tanto, se requiere una fiabilidad y disponibilidad muy altas en todas las condiciones de funcionamiento. El ciclo convertidor y su sistema de control permiten características adicionales para la operación y el mantenimiento, como el arrastre y el avance lento.

La unidad de molienda SAG normalmente está diseñada y optimizada para el proyecto individual.

El requisito del proceso especial define el tamaño del disco, la potencia solicitada y el rango de velocidad de funcionamiento. El motor eléctrico crea fuerzas de tensión en el entrehierro que intenta tirar del estator hacia el rotor. Por lo tanto, la rigidez de los componentes individuales del sistema de accionamiento (motor, fresa, cojinetes y cimentación) debe ajustarse para obtener un margen de seguridad suficiente contra una deformación inadmisibles. Por otro lado, las fuerzas que interactúan entre los componentes deben mantenerse a un mínimo para el diseño económico. Incidentalmente, los molinos SAG grandes instalados como en la fecha se encuentran principalmente en zonas sísmicas críticas. La estructura debe soportar estas fuertes cargas de aceleración sin ningún daño, así como otras condiciones defectuosas como las cargas de cortocircuito eléctrico. Un sistema de control monitorea el disco continuamente y apaga el sistema en caso de emergencia (p.2)

2.2.6.9.4. PROCESO DE DISEÑO

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, Al comienzo de Gearless Drives a finales de los 60, los componentes individuales se diseñaron casi de manera independiente. Solo se intercambiaba información de interfaz muy primaria entre los proveedores de los componentes, como fuerzas

de cimentación bajo cargas operativas y condiciones defectuosas, constantes de resorte mecánicas y magnéticas, principalmente solo como información de una vía. En ese momento, solo se fabricaban tubos de molino pequeños y también las fuerzas magnéticas eran menores en comparación con las grandes plantas de alta potencia actuales. Los cálculos del diseño mecánico se basaron en casos de carga estática en términos de fuerzas y cargas de aceleración. Los modelos de simulación eran muy toscos debido a las capacidades rudimentarias de la computadora que estaban disponibles en este momento. Además, el pre y el post procesamiento de los programas de simulación no permitieron la creación de modelos detallados. Se utilizaron principalmente modelos 2D-FE o modelos de cáscara axisimétrica con carga de Fourier. A finales de los 70, los molinos más grandes se fabricaron para molienda en húmedo, los datos de la base se calcularon con mucho más detalle y se intercambiaron con el fabricante de la fábrica y los ingenieros civiles, y permitieron la optimización iterativa de los sistemas de molino. Las complejidades de la ingeniería aumentaron porque la unidad gearless ya no podía diseñarse según los principios de tensión solamente, sino que también incorporaba principios de rigidez. Los criterios de rigidez deben ser definidos e intercambiados entre el proveedor del motor, el fabricante de la fábrica y el contratista de obras civiles. En este momento, todos los cálculos se basaban principalmente en suposiciones estáticas lineales.

A mediados de los 80, se diseñaron incluso molinos más grandes (32 pies / 36 pies) con potencias nominales de 12,000 kW o más y, por lo tanto, el diámetro y la longitud activa del motor eléctrico también aumentan. Con el aumento del tamaño de las unidades, el comportamiento dinámico de la fábrica y su sistema de accionamiento se hizo cada vez más importante para evitar que el variador

fuera sometido a amplificaciones de resonancia inadmisibles. Además, los estándares revisados para el diseño sísmico, como el Código Uniforme de Construcción (UBC, por sus siglas en inglés) de EE. UU., Requirieron cálculos detallados del espectro de respuesta dinámica. Los primeros pasos para un modelo de sistema 3D general se hicieron para examinar la respuesta sísmica dinámica de la unidad de molienda SAG completa, incluyendo cimentación, molino y cojinete, así como el motor eléctrico. El análisis también fue intercambiado, revisado y discutido con especialistas independientes (p.3)

2.2.6.9.5. DISEÑO DE CONVERTIDOR Y SISTEMA DE CONTROL

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, El circuito básico del convertidor es un ciclo-convertidor en configuración de 12 impulsos. Ha sido seleccionado teniendo en cuenta las bajas corrientes de falla en sitios remotos de la mina y dado que brinda un funcionamiento sin problemas al sistema. El principio de control se basa en orientar el ángulo de fase de las corrientes del estator en relación con el eje de flujo efectivo. Para calcular las condiciones de flujo, el motor se simula mediante dos modelos suplementarios. Esto permite que los motores se alimenten de manera óptima en toda la velocidad y el rango de carga, incluido el posicionamiento a velocidad cero. Basado en un sistema de control multiprocesador que proporciona el procesamiento paralelo de tareas, se logran características de par y corriente superiores. El equipo de control y convertidor se envía como una unidad probada instalada en una casa electrónica con contenedor al sitio para minimizar el tiempo de montaje y puesta en marcha y garantizar el arranque a tiempo (p. 3)

2.2.6.9.6. DISEÑO ELÉCTRICO DEL MOTOR

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, El motor está diseñado para una alta eficiencia, pero también se deben tener en cuenta factores efectivos de utilización del material para obtener un diseño optimizado. El factor de eficiencia de un accionamiento de tal molino está gobernado por pérdidas de devanado (cobre). Debido a las pequeñas frecuencias del estator, las pérdidas de hierro son bajas. La baja velocidad de estos accionamientos de molino también conduce a pérdidas insignificantes de fricción de aire en las piezas giratorias. Por lo tanto, el cobre en el estator y el rotor deben aumentarse al máximo. Eso significa para el bobinado del estator de ranuras con sección transversal de alto devanado y bajo voltaje terminal para minimizar el espesor del aislamiento. Limitaciones de las secciones transversales del bobinado debido al enfriamiento.

los propósitos también deben tomarse en consideración. La sección transversal del conductor debe dividirse en varias líneas para limitar las pérdidas por desplazamiento de corriente. En vista de la optimización, el número de hilos de un devanado uno encima del otro también debe ser limitado. Estas tareas se cumplen mediante devanados de bobina que consisten en un alto número de devanados discretos. Este principio de diseño permite que un gran número de ramas paralelas del devanado del estator conduzcan a una amortiguación efectiva de la atracción magnética no balanceada cuando el motor está girando. Las pérdidas óhmicas del rotor se minimizan según los siguientes principios de diseño: bajo número de polos y bajo número de vueltas por polo combinado con un pequeño espacio de aire. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que un menor

número de polos conduce a yugos más altos en el estator y el rotor y por lo tanto a un aumento en el diámetro y el peso de la máquina eléctrica y debe definirse un mínimo de espacio de aire en cuanto a las tolerancias de instalación y aspectos funcionales. Un pequeño número de vueltas puede conducir a una relación perjudicial entre el voltaje de excitación y la corriente de excitación. La experiencia a largo plazo en el diseño de estos sistemas de accionamiento muestra que la eficiencia del 97% con factores de utilización de más de 10kVAmin / m³ es lo último en tecnología (p. 3)

2.2.6.9.7. DISEÑO MECÁNICO DEL MOTOR

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, La parte no giratoria del motor eléctrico (estator) es una estructura de acero soldada, que transporta las partes activas (núcleo, devanado) y las piezas auxiliares (cajas de terminales, barras colectoras, ventiladores, refrigeradores) La estructura se divide en tres o cuatro partes, dependiendo del tamaño de la unidad, debido a los límites de manipulación y transporte. Opcionalmente al diseño del molino, donde los límites de fatiga y tensión gobiernan el diseño, el estator está diseñado para una rigidez alta suficiente y, por lo tanto, el nivel de tensión en la mayoría de las áreas es muy bajo en comparación con la fatiga del material y el rendimiento. Debido a la rigidez y la deformación, los molinos más grandes requieren muelles de cimentación especiales para desplazar los pies del estator cerca de la línea central. Se debe encontrar el compromiso más económico entre la ampliación de la estructura de cimentación o del estator.

Se deben realizar evaluaciones detalladas para obtener un diseño estructural optimizado.

El cálculo mecánico comienza con la simulación del manejo de las piezas en el taller. El diseño debe ser capaz de soportar el manejo del transporte, como girar, sin dañar las partes sensibles. Tenga en cuenta que estas pesadas partes del estator con pesos de hasta 100 toneladas métricas son "estructuras livianas". La relación de espesor de la chapa a la longitud es inferior a 2 ppm.

También los accesorios para el transporte y manejo en el sitio deben integrarse en la estructura. Se deben tener en cuenta las restricciones de tamaño y peso. El estator debe diseñarse para un tiempo de montaje mínimo en el sitio. Un número reducido de divisiones y bobinas de bobinado elásticas especiales ayudan a minimizar el cierre de los bobinados mediante soldadura fuerte en el sitio. El procedimiento de erección se debe planificar con mucho cuidado para obtener una redondez suficiente del estator y una baja tolerancia a la desviación del entrehierro en la circunferencia. Esto reduce el espacio de aire a un mínimo permitido. Las brechas de aire mayores generarán corrientes de excitación más altas y una disminución de la eficiencia.

La estructura del estator debe tener una resistencia suficientemente alta contra la deformación bajo diversas condiciones de operación. La relación fuerza no lineal del campo magnético puede causar una reducción local inadmisibles del espacio de aire. Estas deflexiones pueden promoverse mediante las tolerancias de montaje y la excentricidad del rotor. Durante el funcionamiento, la distribución del entrehierro alrededor de la circunferencia se supervisa continuamente mediante sensores que apagan el convertidor en caso de emergencia.

El motor accionado por convertidor permite que el molino funcione dentro de un amplio rango de velocidad, desde muy bajas velocidades para fines de mantenimiento hasta la velocidad máxima requerida desde el proceso de

molienda La estructura del estator debe resistir las diversas fuerzas y frecuencias de excitación generadas por el proceso y por el propio motor eléctrico. Debe tenerse en cuenta la expansión térmica restringida y no uniforme de las piezas individuales, así como las cargas elevadas y las amplificaciones dinámicas en condiciones de falla como cortocircuitos y eventos sísmicos.

La interfaz entre el estator y la base también debe diseñarse para las fuerzas de reacción relacionadas. La conexión atornillada debe soportar estas cargas sin ningún movimiento relativo, lo que puede causar problemas con la alineación del estator con el rotor. El estator se erige en una posición axialmente desplazada en el extremo de los pilares de cimentación para tener suficiente acceso a las partes activas del estator y el rotor. El estator se puede desplazar en su posición final mediante placas especiales de rodillos y también hacia atrás para el acceso de mantenimiento. La seguridad contra los eventos sísmicos también debe darse para esta posición cambiada.

Cada máquina eléctrica crea pérdidas térmicas inevitables. Un sistema de enfriamiento efectivo debe garantizar una distribución de temperatura uniforme en toda la circunferencia de estas máquinas grandes. Los ventiladores accionados por motor y los intercambiadores de calor aire-agua están distribuidos alrededor de la circunferencia de la carcasa del estator. Este sistema patentado de ventilación por satélite garantiza una distribución uniforme del aire de enfriamiento en todos los sectores de la máquina. De este modo, el aumento de temperatura del devanado del estator es igual a lo largo de la gran circunferencia del estator. Una gran cantidad de ventiladores aseguran el funcionamiento de la planta en caso de falla del ventilador.

El rotor está envuelto directamente alrededor del cuerpo del molino. Los segmentos de postes con cuatro polos eléctricos se colocan juntos en las unidades pre-montadas para obtener un tiempo de montaje mínimo. Estos segmentos de polo están conectados a la brida del molino por medio de cuatro pernos. Los pernos exteriores están equipados con casquillos ajustables especiales para permitir el ajuste local del espacio de aire. Todas las fuerzas operativas deben transmitirse por fricción a la brida del molino para evitar que la unión entre el material abrasivo. El efecto de la expansión térmica no uniforme entre la brida del molino y el segmento del rotor, así como la ovalización del cuerpo del molino tiene un efecto menor en los sistemas de molino semiautogeno y está cubierto por el factor de seguridad necesario para las condiciones defectuosas. Las bobinas del rotor consisten en una barra de cobre sólido con áreas de superficie extendida para fines de enfriamiento. La fijación de las bobinas debe permitir la expansión térmica, pero debe tener suficiente resistencia contra las fuerzas electromagnéticas en caso de cortocircuito. Se debe prestar especial atención a la interfase entre las partes giratoria y no giratoria del motor eléctrico: el espacio de aire. El campo magnético crea altas fuerzas de tensión radial entre los polos del rotor y el orificio del estator. El comportamiento de la fuerza frente a la deflexión de este tirón magnético es extremadamente no lineal. Por lo tanto, las posibles desviaciones del pequeño entrehierro nominal generado por deflexión o desplazamiento de piezas producen diferencias significativas en las fuerzas magnéticas locales a lo largo de la circunferencia y en las deflexiones adicionales. Las deflexiones locales durante el arranque son mucho más severas que las de operación normal debido a la no linealidad de la curva de saturación de hierro. La influencia de estas

fuerzas electromagnéticas es en general mucho más alta que cualquier efecto de gravedad generado por el peso muerto de las partes. Además, variarán las fuerzas tangenciales ser generado por el campo magnético debajo de cada polo. El valor medio de todas estas fuerzas alrededor de la circunferencia es igual al par del motor (p. 3,4)

2.2.6.9.8. INGENIERÍA DE SISTEMA SIMULTANEO

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, En la fase de diseño de un proyecto de fábrica, muchos proveedores diferentes deben trabajar juntos para obtener un diseño optimizado del sistema en muy poco tiempo. Por lo tanto, en la etapa de diseño inicial, deben definirse valores objetivo validados para la interacción entre los principales componentes del sistema de accionamiento (motor, fresa, cojinetes y cimentación) para permitir la ingeniería simultánea de las piezas individuales. Se deben encontrar sustitutos simples para ensambles estructurales y procesos muy complejos para permitir un avance suficiente y preciso

molde de la estabilidad del sistema. Para los casos de carga estática, la rigidez lineal y las fuerzas, momentos de la interfaz o deflexión son adecuados. Cualquiera de estos valores necesita una definición precisa para evitar interpretaciones erróneas. Los márgenes de seguridad deben definirse para compensar las desviaciones del diseño final. El diseño mecánico de un sistema de accionamiento de fresa comienza con un simple diagrama de resortes, que incluye el cumplimiento de los componentes y las tolerancias de ensamblaje y operación.

Con el aumento del tamaño de los accionamientos del molino, este modelo simplificado de muelles lineales debe sustituirse por un modelo más preciso, que incluya la no linealidad de la relación entre la fuerza del entrehierro local y la relación de deflexión y permita el examen de las frecuencias naturales.

El estator se modela como una estructura de carcasa soportada por resortes de cimentación lineales. El molino se agrega como un cuerpo rígido soportado también por muelles, que representan la rigidez del cuerpo del molino, así como la rigidez del rodamiento y la cimentación. En el entrehierro se modelaron relaciones de fuerza no lineales locales contra deflexión de acuerdo con el comportamiento electromagnético de la máquina. Se deben usar métodos especiales de cálculo para integrar el comportamiento magnético y mecánico y para permitir tiempos de respuesta rápidos para la optimización del sistema en términos de deflexión y vibración (p. 4,5)

2.2.6.9.9. HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, El análisis de un sistema mecatrónico tan complejo que consta de componentes mecánicos y electrónicos requiere herramientas modernas de diseño y cálculo. Normalmente los programas de simulación no tienen características para el modelado preciso directo de todos los efectos solicitados. Un sistema de programa de simulación útil debe tener una arquitectura abierta para permitir la integración de efectos especiales, como el comportamiento electromagnético local del motor y el convertidor con suficiente precisión. La integración completa de las subrutinas controladas por el usuario es necesaria para obtener tiempos de procesamiento cortos aceptables. En nuestro caso, las relaciones de fuerza

no lineal frente a deflexión en cualquier lugar del entrehierro se manipularon en cada paso de la integración. Una sustitución con las ecuaciones electromagnéticas para los componentes del motor (polos del rotor y devanados del estator) permite el cálculo directo de la respuesta estática y dinámica de la estructura mecánica al incluir los valores dinámicos para las corrientes del estator y del rotor. Las grandes deflexiones deben tenerse en cuenta. Tenga en cuenta que, por ejemplo, la desviación de 1 mm de una estructura de 20 m de altura es "pequeña", pero 1 mm en un espacio de aire extremadamente no lineal de 15 mm es "grande".

Es necesario describir las fuerzas magnéticas que actúan entre el rotor y el devanado del estator individualmente para cada polo, ya que hay una interacción de deflexión estator local, fuerzas magnéticas y espacio de aire. Por lo tanto, se requiere una subrutina especial que calcule las fuerzas magnéticas radiales y tangenciales, siendo fuertemente dependientes de la línea del espacio de aire real. No solo se debe tener en cuenta el espacio de aire radial, sino también el desplazamiento tangencial local del rotor con relación al sistema del estator. Ambos valores dependen del tiempo, si el cuadro del estator comienza a vibrar. En condiciones normales de funcionamiento, los polos están parcialmente saturados, lo que influye en las fuerzas magnéticas excitadas. Es esencial incluir este efecto en el modelo. La dependencia del tiempo de la corriente generada por el convertidor también afecta las fuerzas magnéticas, especialmente el componente de par tangencial local. Esta corriente contiene pulsaciones que pueden crear excitaciones en un rango de frecuencia media por debajo de la variación del campo del estator. Finalmente, debe mencionarse que la rigidez de los soportes, que soportan el bastidor del estator, es importante y debe

modelarse. Especialmente si el movimiento del cuerpo rígido del bastidor del estator está en el mismo rango de frecuencia que sus primeros modos elásticos, esto debe incluirse (p. 5,6)

2.2.6.9.10. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A Mechatronic Solution Design And Experience With Large Gearless Mill Units, mencionan que, Bien conocidos son en la dinámica del sistema monótono y la inestabilidad "oscilante". Ambas situaciones pueden ocurrir en unidades de fresado sin engranajes grandes, cuando el comportamiento estructural del sistema no está optimizado.

Inestabilidad Monótona: Las fuerzas magnéticas radiales entre los polos del rotor y los devanados del estator se producen en la fase de arranque inicial durante la magnetización del rotor, incluso si el campo del estator es cero y antes de que el rotor gire. Estas fuerzas aumentan, mientras que la corriente de magnetización crece. Estas fuerzas radiales comienzan a desviar la estructura del estator. La forma deformada es muy similar al modo de flexión transversal del estator, pero no vibra.

Si las fuerzas aumentan aún más y la estabilidad del sistema no se da, esta forma puede volverse inestable y monótona. En este caso, el crecimiento inestable de la flexión de la estructura del estator comienza lentamente y aumenta rápidamente más tarde. En condiciones normales de funcionamiento, esta inestabilidad desaparecería debido a la saturación de los polos magnéticos. El efecto sobre la frecuencia del sistema natural también se puede observar. El efecto es fuertemente no lineal y muy similar al problema bien conocido del haz vertical inestable bajo carga vertical.

Inestabilidad oscilante: Las fuerzas tangenciales "generadoras de par", que son producidas por el campo circulante en el marco del estator e inducen el giro del rotor, pueden causar varios efectos dinámicos diferentes: Las débiles vibraciones tangenciales y elásticas del bastidor del estator, causadas por las desigualdades del proceso de fresado, provocan que el par en el rotor (y el bastidor del estator) vibren a lo largo de la curva del ángulo de arrastre con la misma frecuencia. Si la inclinación de esta curva es suficientemente fuerte, puede producirse una autoexcitación del marco del estator. Si el sensor del control de velocidad se fija en el bastidor del estator que mide la superficie del rotor, se inducen movimientos tangenciales de este sensor, si la estructura del estator vibra en la forma del modo relacionado.

También bajo tales condiciones puede surgir la excitación propia. También las fluctuaciones de la corriente por medios internos del convertidor pueden generar armónicos del par y excitar el marco del estator. Si el convertidor produce una corriente, que contiene una partición con doble frecuencia de vibración. En este caso, la curvatura de la curva del ángulo de arrastre es importante para la estabilidad del movimiento del marco del estator (p. 6,7)

2.2.6.9.11. EXPERIENCIA DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA EN EL TIEMPO

Dr. Ing. Kümmler H. y Dr. Ing. Meinke P. en su artículo A mechatronic solution design and experience with Large Gearless mill units, mencionan que, Desde 1980, la industria de procesamiento de minerales ha pedido 26 accionamientos sin engranajes con una capacidad total de más de 300 MW. 20 sistemas en el rango de potencia de 4 a 20.4 MW diseñados para molinos de 16.4 pies a 40 pies de diámetro interno están en operación. Algunas instalaciones más grandes

en operación desde 1998 son de 20.4 MW para un molino de 38 pies en Freeport, Indonesia y un motor de 20 MW para un molino de 40 pies en Cadia, Australia (p. 6,7)

Las unidades sin engranajes están bien establecidas en esta industria por su gran fiabilidad. La experiencia en instalación y operación y la demanda de la industria.

Figura N°2. 19: Instalación de polo en carcasa de molino – rotor.



Fuente: SME Annual Meeting, 2007, Denver, CO – “Technical And Commercial Benefits Of Gearless Mill Drives For Grinding Applications”

2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.

2.3.1. HIPOTESIS GENERAL

El diseño de un molino de bolas enmarcado en el protocolo de fabricación del mismo, proporcionara la obtención de parámetros de fabricación y/o adquisición de los componentes del diseño.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.

- a) El desarrollo del protocolo de diseño nos permitirá conocer características de cada uno de los componentes del molino semiautogeno de acuerdo a lo requerido por una planta de procesamiento de minerales que en la actualidad se encuentra en funcionamiento.
- b) Determinar mediante la manufacturación computacional si los datos obtenidos para el presente diseño son concordantes.
- c) Impedir durante la fabricación del presente molino tener inconvenientes relacionados a cada uno de los componentes.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

La presente investigación es de metodología explicativa y a su vez exploratoria debido a la necesidad de alcanzar datos exactos para que nos permitan fabricar un molino semiautogeno de accionamiento sin engranajes así mismo no se cuentan con datos exactos acerca de la fabricación de los mismos a pesar de ser equipos de uso actual en la minería no se cuenta con los datos suficientes para la fabricación de los mismos la esencia de la presente investigación es obtener un diseño que nos permita realizar la fabricación del mismo

3.2. POBLACION Y MUESTRA DE INVESTIGACION

3.2.1. UBICACIÓN

El distrito minero Las Bambas se encuentra ubicado a 565 km al SE de la ciudad de Lima y a 73 km al SO de la ciudad de Cusco, en parte de los distritos de Challhuahuacho y Coyllurqui (provincia de Cotabambas) y Progreso (Provincia de Grau) en el departamento de Apurímac. Las altitudes dentro del proyecto varían desde los 3,700 hasta los 4,650 msnm.

3.2.2. ACCESIBILIDAD

Por vía aérea hasta Cusco, luego se continua por vía terrestre (240 km aproximadamente en 7 horas) o en helicóptero hasta el proyecto (73 km en 40 minutos).

Para llegar al proyecto desde Lima y las principales ciudades del S del Perú, existen varias rutas:

- Cusco – Yaurisque – Ccoyabamba – Ccapacmarca – Mara – Challhuahuacho – Las Bambas, carretera afirmada de 240 km aproximadamente. Esta ruta es la que se emplea actualmente como oficial.
- Cusco – Cotabambas – Tambobamba – Challhuahuacho - Las Bambas, carretera afirmada de 250 km aproximadamente.
- Cusco - Cotabambas – Ñahuiña – Pamputa - Las Bambas, carretera afirmada de 240 km aproximadamente.
- Arequipa – Imata - Espinar – Vellille - Santo Tomás – Haqira – Challhuahuacho – Las Bambas. De Arequipa a Imata es vía asfaltada, y el resto es carretera afirmada.
- Lima – Ica – Nazca – Puquio – Chalhuanca – Puente Pachachaca – Lambrama – Chuquibambilla – Progreso – Challhuahuacho – Las Bambas.

3.2.3. CLIMA

Es variado y se caracteriza por periodos de lluvias, de frío, templado y seco. El periodo de lluvias generalmente se inicia en octubre, acentuándose desde diciembre hasta marzo. La presencia de descargas eléctricas es considerada de alto riesgo en la zona del proyecto durante este periodo.

A partir de abril hasta septiembre, durante el día la temperatura presenta fuertes cambios desde 5°C en las mañanas hasta 25°C al mediodía. En las noches la temperatura decrece hasta por debajo de 0°C en horas de la madrugada.

El periodo de vientos ocurre entre los meses de julio y septiembre y su intensidad aumenta después de las 13 horas hasta las 17 horas. En el resto del año la intensidad del viento es débil a moderada.

Normalmente la humedad relativa en toda la sierra está por debajo del 90%, en general el clima es seco.

3.2.4. CONCESIONES MINERAS

El Proyecto Las Bambas cuenta con un derecho de 33,063 ha. Dentro de las cuales se observan cuatro concesiones mineras.

- Ferrobamba – 400 ha
- Chalcobamba – 600 ha
- Sulfobamba – 400 ha
- Charcas – 400 ha

Estas cuatro concesiones mineras que corresponden a Activos Mineros S.A.C. (antes Centromín Perú) que tienen una extensión total de 1,800 ha.

3.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCION DE INFORMACION:

La recolección de datos necesarios para la presente investigación se realizó mediante el manual de operación en función a los cuales vienen operando cada uno de los equipos presentes en los procesos de producción presentes en el yacimiento minero.

Esto debido a que en dicho manual se hace referencia a los parámetros dentro de los cuales debe de trabajar cada uno de los equipos necesarios para el proceso programado.

3.4. TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS:

El procesamiento de datos no fue realizado mediante la aplicación de alguna metodología específica o estadística en vista que la presente investigación es de carácter analítico y se basa en datos establecidos invariables. Los cuales son establecidos por la necesidad de los usuarios de equipo formulado.

Para la realización de la presente investigación se tuvo que realizar análisis documental correspondiente a equipos similares, observación de las características concernientes al funcionamiento de equipos similares. Catalogándose estas como técnicas utilizadas para la presente investigación

la utilización de material bibliográfico correspondiente a información de las características correspondientes al equipo motivo de la presente investigación, características de materiales a ser utilizados, utilización de software de simulación para la corroboración de los cálculos correspondientes. Catalogándose estas como instrumentos para la presente investigación.

3.5. PLAN DE TRATAMIENTO DE DATOS

La implementación de un protocolo de diseño se enmarca en la consideración general de los componentes presentes en el global del diseño ya sea estos para ser fabricados o para ser adquiridos ya fabricados, un protocolo tiene por fin poder aportar al usuario características suficientes para la implementación global de los componentes planteados.

para la particularidad de la fabricación de componentes se deberá proporcionar las características del material sean estas físicas, dimensiones de fabricación, teniendo esto como finalidad la implementación de dicho componente.

En caso de la compra de componentes estos deberán de poder ser proveídos de manera fácil por proveedores que los mantengan en el mercado con la finalidad de poder ser reemplazados en caso de presentar alguna avería o desgaste durante su funcionamiento.

Dentro de los conceptos que se enmarcan dentro del protocolo para la obtención de datos finales de diseño se considera pertinente tener presente el diagrama de desarrollo de características en las cuales se basa el presente protocolo.

Figura N°3. 1: Diagrama de componentes del protocolo.



Fuente: Elaboración Propia

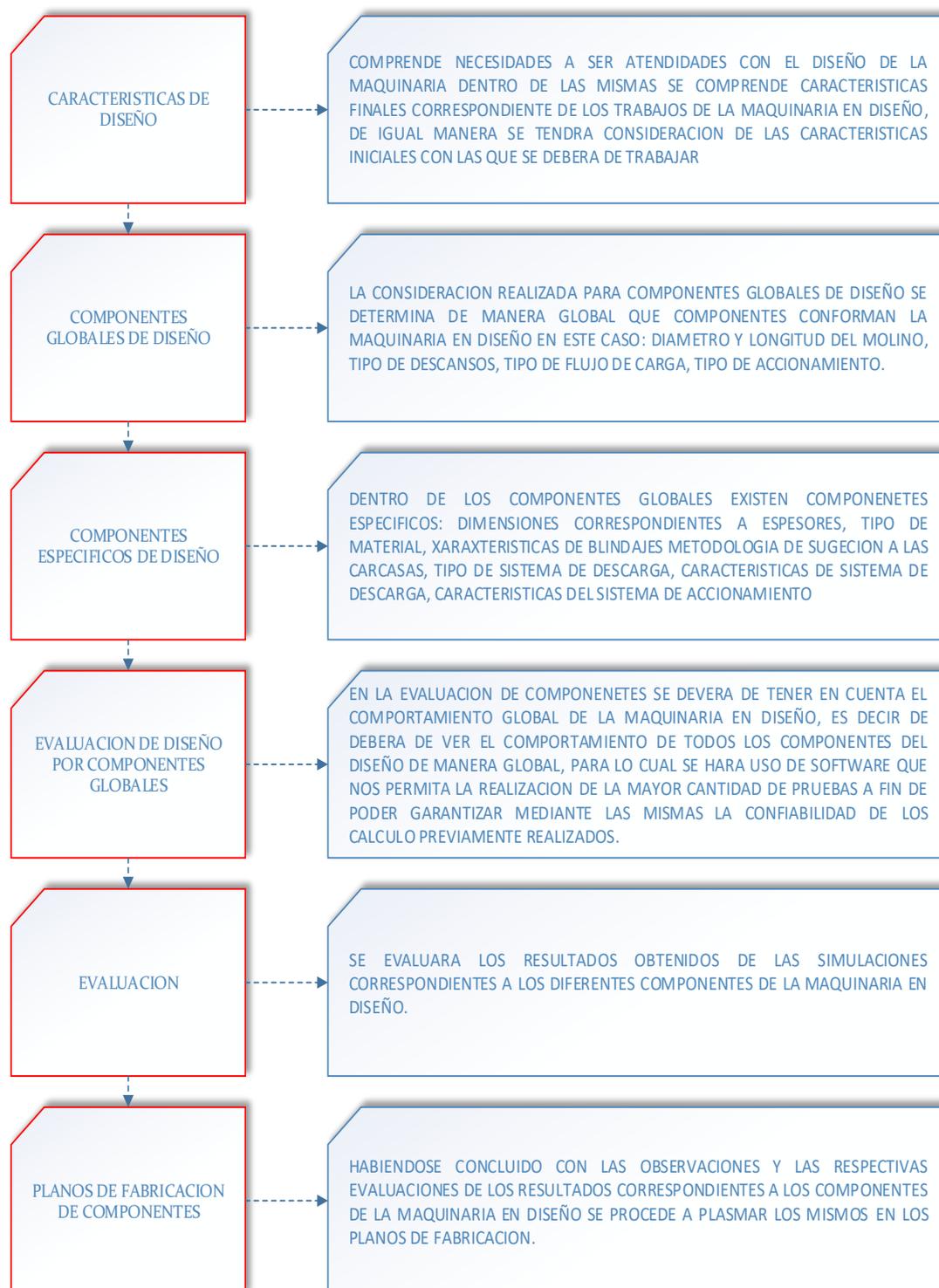
Para la determinación de componentes globales y específicos se realizó de manera cuantitativa, por consecuencia derivo en una metodología analítica, de tal manera que nos permita visualizar de manera aislada cada uno de los fenómenos físicos y poder analizarlos de manera ordena.

3.5.1. PROTOCOLO DE DISEÑO DE MOLINO DE BOLAS

Para la realización de un protocolo es necesario tener en cuenta que se deberá de tener especial énfasis en la mayor precisión posible en la elaboración de cada uno de los componentes específicos de ser estos fabricados, de igual manera se deberá de tener en cuenta las características dimensionales de aquellos componentes que serán adquiridos, esto debido a que de no coincidir con los elementos dimensionados para su fabricación estos no coincidirán entre sí y por consiguiente serán defectuoso para el momento del ensamblado de los mismos, generándose así percances durante el ensamblaje y sobre costos al momento de la implementación de la maquinaria en diseño

Para la implementación del presente protocolo de diseño se determinó la implementación del protocolo de acuerdo a la siguiente gráfica:

Figura N°3. 2: Descripción de componentes del protocolo.



Fuente: Elaboración Propia

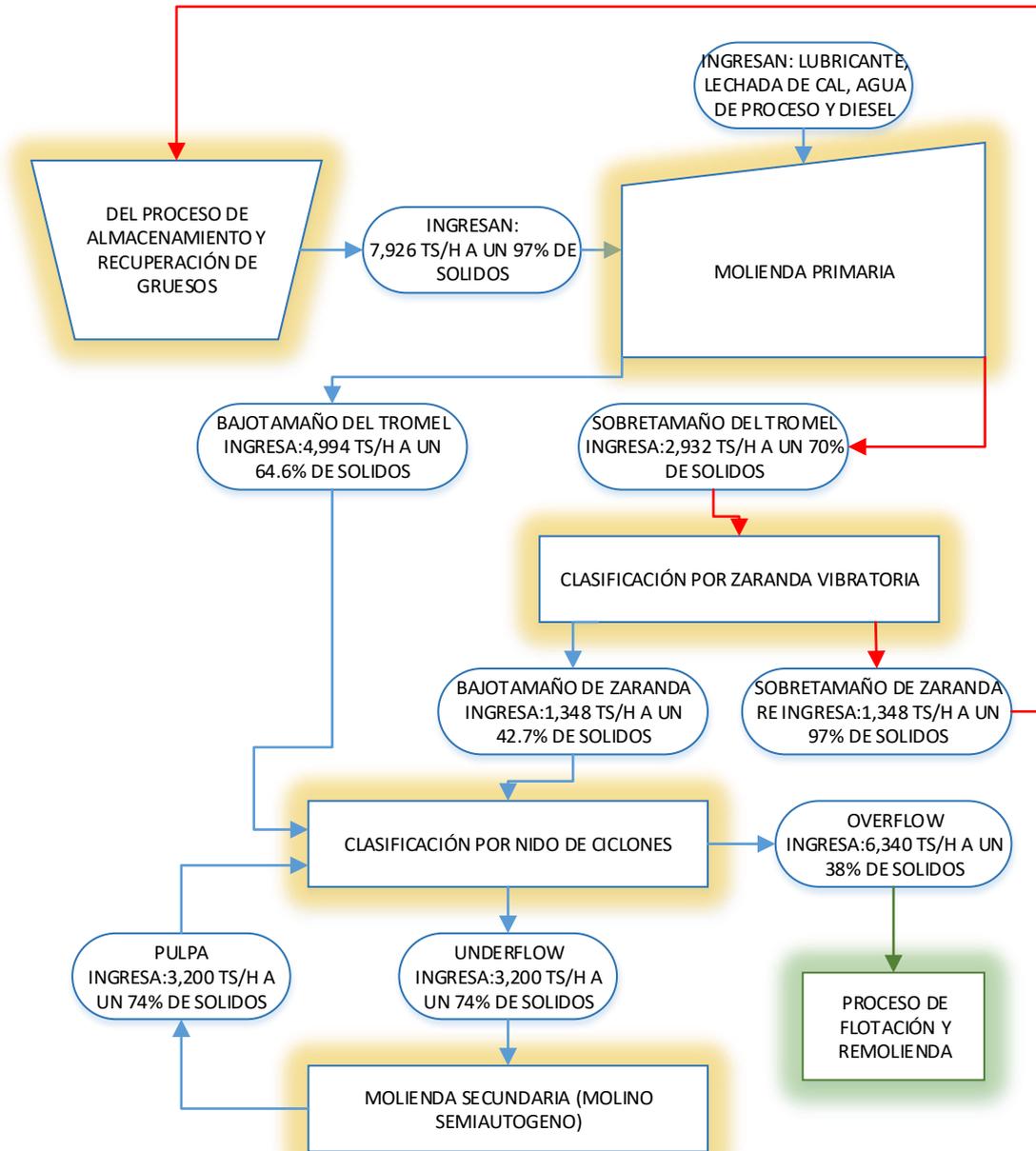
3.5.1.1. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

DETERMINACIÓN DE LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN.

Para el presente proyecto se tomaron los parámetros de necesidad correspondiente al molino de bolas dentro del proceso de selección de la minera las bambas. La cual se detalla a continuación.

Las características primordiales serán tomadas de la población seleccionada en este caso la minera las bambas de la empresa MMG de la cual de acuerdo a datos observados en el manual de operación se tiene el diagrama de flujo de molienda de la línea n°1:

Figura N°3. 3: Esquema de proceso de molienda.

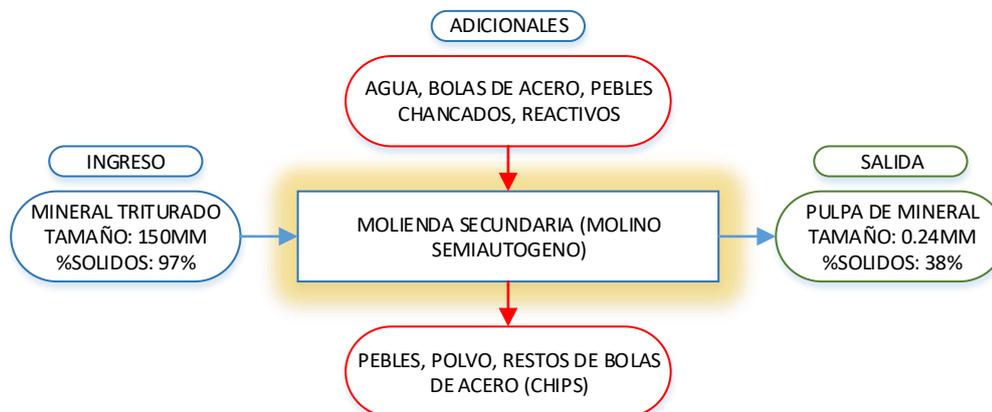


Fuente: Manual De Operaciones – Minera Las Bambas

Elaboración: Propia

Teniendo en cuenta que el presente proyecto se centra en el diseño de molino bolas el cual se propone para molienda secundaria, dentro de la cual se contemplan los parámetros específicos del equipo de acuerdo al siguiente detalle:

Figura N°3. 4: Esquema de molienda en molino semiautogeno.



Fuente: Manual De Operaciones – Concentración – Minera Las Bambas

Elaboración: Propia

Los parámetros determinados por los procesos previos y posteriores a la maquinaria motivo del presente proyecto nos permiten adecuarnos a las mismas con la finalidad de satisfacerlas en su totalidad.

3.5.1.2. COMPONENTES GLOBALES DE DISEÑO

DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES INICIALES DE DISEÑO.

Se puede observar en el grafico anterior que el componente encargado de proporcionar el trabajo final para el traslado en dirección al proceso posterior a molienda es la molienda secundaria la cual se desarrolla con un molino semi autógeno para el cual ya se cuenta con la cantidad de material que deberá de procesarse para satisfacer el proceso solicitado por la línea de molienda n°1, en el presente proceso de molienda también existen parámetros de ingreso y salida de material en cuanto a las dimensiones underflow y la de pulpa para el proceso de flotación, las cuales se detalla según el siguiente gráfico.

Una vez obtenidos los datos requeridos por el usuario y por consiguiente necesidad primordial a satisfacer se procede a utilizar los mismos para la determinación de datos de diseño.

CARACTERÍSTICAS DE MOLIENDA DEL TERRENO:

- $Wi_{BM} = 8.3 \text{ unidades metricas}$
- $Wi_{RM} = 12.7 \text{ unidades metricas}$
- $Wi_c = 9.0 \text{ unidades metricas}$

DATOS DE LINEA DE MOLIENDA GENERAL:

- Alimentación trituradora primaria = 1500 mm
- Alimentación para flotación = 0.24 mm

Aplicando la ecuación (2.5) potencia de máxima eficiencia.

$$\begin{aligned}
 E &= 10 \times Wi_c \left(\frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \\
 &+ \left[10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{2100}} - \frac{1}{\sqrt{10000}} \right) \right. \\
 &\left. + 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{2100}} \right) \times EF_{5_{BM}} \right] \times EF_{4_{BM}}
 \end{aligned}$$

Remplazando:

$$\begin{aligned}
 E &= 10 \times Wi_c \left(\frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{1500000}} \right) \\
 &+ \left[10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{2100}} - \frac{1}{\sqrt{10000}} \right) \right. \\
 &\left. + 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{240}} - \frac{1}{\sqrt{2100}} \right) \times EF_{5_{BM}} \right] \times EF_{4_{BM}}
 \end{aligned}$$

$$E = 10 \times Wi_c(0.0092) \\ + [10 \times Wi_{RM}(0.0118) + 10 \times Wi_{BM}(0.0427) \times EF5_{BM}] \times EF4_{BM}$$

$$E = 10 \times 9.0(0.0092) \\ + [10 \times 12.7(0.0118) + 10 \times 8.3(0.0427) \times EF5_{BM}] \times EF4_{BM}$$

La constante $EF4_{BM}$ se evalúa en 1.01 para su aplicación, el $EF5_{BM}$ para molienda de bolas no se aplica en vista que el tamaño de final de proceso es mucho mayor a $75 \mu\text{m}$ la ecuación se simplifica en:

$$E = 10 \times 9.0(0.0092) + [10 \times 12.7(0.0118) + 10 \times 8.3(0.0427) \times 1.00] \times 1.01$$

$$E = 0.8280 + [1.4986 + 3.5441] \times 1.01$$

$$E = 0.8280 + [5.0427] \times 1.01$$

$$E = 0.8280 + 5.0931$$

$$E = 5.9211$$

Remplazando en la ecuación (2.6) se obtiene

$$E_{total} = 1.10 \times 5.9211 = 6.61 \text{ kWh/tonelada}$$

Para determinar el consumo de energía del proceso previo a la molienda por molino de bolas. Aplicando la ecuación (2.7)

$$E_{SAG} = \left[10 \times Wi_C \left(\frac{1}{\sqrt{P_C}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) + 10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{P_R}} - \frac{1}{\sqrt{P_C}} \right) \times EF4_{RM} \right. \\ \left. + 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{P_R}} \right) \times EF4_{BM} \times EF5 \right] \times 1.25 \\ - 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{T_{80}}} \right) \times EF4_{BM} \times EF5$$

$$E_{SAG} = \left[10 \times Wi_C \left(\frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{1500000}} \right) + 10 \times Wi_{RM} \left(\frac{1}{\sqrt{2100}} - \frac{1}{\sqrt{10000}} \right) \times 1 \right. \\ \left. + 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{2100}} \right) \times 1 \times 1 \right] \times 1.25 \\ - 10 \times Wi_{BM} \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{3200}} \right) \times 1 \times 1$$

$$E_{SAG} = \left[10 \times 9.0 \left(\frac{1}{\sqrt{10000}} - \frac{1}{\sqrt{1500000}} \right) + 10 \times 12.7 \left(\frac{1}{\sqrt{2100}} - \frac{1}{\sqrt{10000}} \right) \times 1 \right. \\ \left. + 10 \times 8.3 \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{2100}} \right) \times 1 \times 1 \right] \times 1.25 \\ - 10 \times 8.3 \left(\frac{1}{\sqrt{110}} - \frac{1}{\sqrt{3200}} \right) \times 1 \times 1$$

$$E_{SAG} = [0.8280 + 1.4986 + 6.1005] \times 1.25 - 10 \times 8.3(0.0777) \times 1 \times 1$$

$$E_{SAG} = [8.4271] \times 1.25 - 6.4491$$

$$E_{SAG} = 10.5338 - 6.4491$$

$$E_{SAG} = 4.0847 \text{ KWh/tonelada}$$

Para determinar la energía específica en el molino de bolas aplicamos la ecuación (2.8)

$$E_{total} = E_{BM} + E_{SAG}$$

$$6.61 = E_{BM} + 4.0847$$

$$E_{BM} = 2.5253 \text{ KWh/tonelada}$$

Para determinar potencia total en el molino de bolas ecuación (2.10)

POTENCIA TOTAL EN MOLINO DE BOLAS (GEARLESS)

$$= \left(E_{BM} \times \frac{\text{ton}}{\text{hora}} \right) \div 1.000 \div 0.94$$

POTENCIA TOTAL EN MOLINO DE BOLAS (GEARLESS)

$$= (8080.96) \div 1.000 \div 0.94$$

$$POTENCIA TOTAL EN MOLINO DE BOLAS (GEARLESS) = 8596.77 \text{ KW}$$

Configurando la potencia obtenida en 9MW se procede a seleccionar la dimensión del molino de bolas en funciona a la gráfica proporcionada por un consultor americano.

Lo correspondiente a los 9MW es 80,000 de donde se puede determinar que:

$$80000 = D^{2.5} \times \text{longitud efectiva de molienda(EGl)}$$

Del grafico tenemos que D= 22' (pies) (6.7056 metros)

Remplazando:

$$80000 = 22^{2.5} \times \text{longitud efectiva de molienda(EGl)}$$

$$80000 = 2270.16 \times \text{longitud efectiva de molienda(EGl)}$$

$$\text{longitud efectiva de molienda(EGl)} = 35.24' (10.74 \text{ metros} \approx 10.80 \text{ metros})$$

CALCULO DE CRITERIOS DE OPERACIÓN.**ALTURA DE CARGA.**

De la figura N°2.7. Se obtiene datos para la determinación de datos correspondiente a la altura de carga. Los mismos que se detallan en el siguiente cuadro.

Tabla N°3. 1: Altura de carga.

θ°	$2 \theta^\circ$	$2 \emptyset$					H	VOL ELEM. M.	% VOL ELEM. M.
		en RAD	R	W	Hb				
0	0	0.00	3.35	0.00	0.00	3.35	0.00	0.00	
10	20	0.35	3.35	1.16	0.05	3.30	0.04	0.11	
20	40	0.70	3.35	2.29	0.20	3.15	0.31	0.88	
30	60	1.05	3.35	3.35	0.45	2.90	1.02	2.88	
40	80	1.40	3.35	4.31	0.78	2.57	2.31	6.55	
50	100	1.75	3.35	5.14	1.20	2.16	4.27	12.10	
60	120	2.09	3.35	5.81	1.68	1.68	6.90	19.55	
70	140	2.44	3.35	6.30	2.21	1.15	10.12	28.66	
80	160	2.79	3.35	6.60	2.77	0.58	13.77	39.00	
90	180	3.14	3.35	6.71	3.35	0.00	17.66	50.00	

Fuente: elaboración propia

Considerando un ángulo típico para este tipo de molinos es entre 70° a 80°, de igual manera el porcentaje de elementos molturadores presentes en el interior del molino no deberá de superar el 45%, en concordancia con estas

observaciones y de acuerdo a lo determinado de la figura 07. Se considera 70° .

Se determina que cumple con las condiciones estándares de diseño.

Aplicando la ecuación (2.11). Altura de carga.

$$H_B = \frac{d}{2}(1 - \cos\theta)$$

$$H_B = \frac{22'}{2}(1 - \cos(70^\circ))$$

$$H_B = 11'(1 - \cos(70^\circ))$$

$$H_B = 7.238' = 2.204 \text{ metros}$$

VOLUMEN DE CARGA.

el porcentaje del volumen del molino ocupado por el material, se determina en función del volumen de carga de elementos molturadores y roca mineralizada.

De la tabla A. obtenemos que el porcentaje ocupado por el material corresponde al 28.66% para un ángulo interior del molino de 70° . De lo cual se determina que el volumen total correspondiente al molino de acuerdo a las dimensiones iniciales de diseño.

$$V_M = \pi \cdot R^2 \cdot L$$

$$V_M = \pi \cdot 3.3528 \text{ m}^2 \cdot 10.80 \text{ m}$$

$$V_M = 380.77 \text{ m}^3$$

Lo correspondiente al 28.66% es:

$$V_T = 28.66 \% = 109.12 \text{ m}^3$$

Aplicando la ecuación (2.12). Volumen de elementos molturadores.

$$V_B = V_T * \%_{elem.molt.}$$

$$V_B = 109.12 \text{ m}^3 \cdot 0.4 = 43.65 \text{ m}^3$$

$$V_R = V_T - V_B$$

$$V_R = 109.12 \text{ m}^3 - 43.65 \text{ m}^3 = 67.47 \text{ m}^3 = 17.19 \% \text{ de } V_M$$

ELEMENTOS MOLTURADORES.

Aplicando la ecuación (2.14). Tamaño inicial de elementos molturadores.

$$d_B = 0.4 \times K \times \sqrt{F}$$

Para minerales duros como el que contiene el cobre para este caso, el valor de K es de 5.74, factor que depende de importantes variables de operación.

$$d_B = 0.4 \times 5.74 \times \sqrt{15 \text{ cm}}$$

$$d_B = 8.8923 \text{ cm}$$

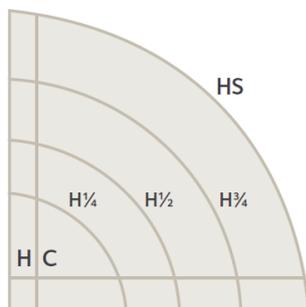
en vista que los elementos molturadores correspondientes al molino de bolas deberán de tener una dimensión muy próxima a las tres pulgadas y media deberá de considerarse dicha dimensión en cuanto a los proveedores de dichos accesorios de molienda para lo cual se detalla lo siguiente.

Figura N°3. 5: Características de elementos molidores.

Dureza volumétrica
60/65 HRC

Fórmula de la Dureza Volumétrica

$$H_{vol} = 0,008HC + 0,063H\frac{1}{4} + 0,203H\frac{1}{2} + 0,437H\frac{3}{4} + 0,289HS$$



HC: Dureza en el centro
 H¼: Dureza a un cuarto del radio desde el centro
 H½: Dureza a la mitad del radio
 H¾: Dureza a tres cuartos del radio desde el centro
 HS: Dureza en la superficie

Fuente: Catalogo Acindar – Bolas para molienda

Observamos que cuentan dentro de los equipos requeridos las dimensiones necesarias para el funcionamiento correcto del molino en diseño.

Tabla N°3. 2: Características de elementos de molienda por diámetro.

Medidas nominales

Diámetro nominal	Diámetro mínimo	Diámetro máximo	Peso nominal	Peso mínimo	Peso máximo
pulgadas	mm	mm	g	g	g
1½	37,1	41,1	227	226	271
2½	62,5	67,5	1052	1046	1255
3	75,2	81,2	1819	1808	2168
3½	87,9	94,9	2888	2871	3443

Fuente: Catalogo Acindar – Bolas para molienda

ROTACIÓN DEL MOLINO Y VELOCIDAD CRÍTICA.

Aplicando la ecuación (2.20). Velocidad crítica del molino.

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{(D - d)}} \text{ rpm}$$

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{(6.7056 \text{ m} - 0.089 \text{ m})}} \text{ rpm}$$

$$V_c = 16.445 \text{ rpm}$$

Asumiendo que la velocidad del molino es un 25% menor acorde a las características de funcionamiento de equipos similares. Se determina.

$$V = 12.00 \text{ rpm}$$

POTENCIA DEL MOTOR.

Aplicando la ecuación (2.24). Potencia del motor.

$$M_{PRO} = (\%_{VEM} \cdot \rho_{EM} + (1 - \%_{VEM}) \cdot \rho_{MN}) \cdot V_{PRO}$$

$$M_{PRO} = \left(0.4 \cdot 8022.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + (1 - 0.4) \cdot 1280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 109.12 \text{ m}^3$$

$$M_{PRO} = 437906.09 \text{ kg}$$

La distancia correspondiente entre el eje de giro del molino y el centro de masa del material siendo procesado

Aplicando la ecuación (2.25). Distancia del eje de giro del molino al centro de masa.

$$L = \left(\frac{\Phi_{MOL}}{2} \right) - H_b + \frac{4H_b}{3\pi}$$

$$L = \left(\frac{6.7056 \text{ m}}{2} \right) - 2.20 + \frac{4(2.20)}{3\pi}$$

$$L = 1.3862 \text{ m}$$

Aplicando la ecuación (2.26). Velocidad de giro del molino.

$$\omega_{MOL} = \frac{12[RPM] \cdot 2 \cdot \pi}{60}$$

$$\omega_{MOL} = 1.25 \text{ rad/s}$$

Aplicando la ecuación (2.9). Potencia del molino.

$$POTENCIA \text{ TOTAL EN MOLINO DE BOLAS} = (E_{BM} \times \text{ton/hora}) \div 0.985 \div 0.94$$

$$POTENCIA \text{ TOTAL EN MOLINO DE BOLAS} = (2.5253 \times 3200) \div 0.985 \div 0.94$$

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS = 8080.96 \div 0.985 \div 0.94$$

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS = 8727.68\ kW$$

Aplicando la ecuación (2.10). Potencia del molino Gearless

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS\ (GEARLESS) = \left(E_{BM} \times \frac{ton}{hora} \right) \div 1.000 \div 0.94$$

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS\ (GEARLESS) = (2.5253 \times 3200) \div 1.000 \div 0.94$$

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS\ (GEARLESS) = (8080.96) \div 1.000 \div 0.94$$

$$POTENCIA\ TOTAL\ EN\ MOLINO\ DE\ BOLAS\ (GEARLESS) = 8596.77\ kW$$

3.5.1.3. COMPONENTES ESPECÍFICOS DE DISEÑO

DISEÑO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

SISTEMA DE DESCARGA.

De acuerdo a lo requerido por el sistema de fragmentación correspondiente al lugar de implementación de la maquinaria se determina la aplicación de un sistema de descarga que permita la fluidez constante de material ya procesado el mismo que deberá de ser controlado, por lo cual se determina la aplicación de un diafragma en “over Flow”.

ESPESOR DE CARCASA.

Previamente se deberá de tener en cuenta el comportamiento del molino con relación a los soportes teniendo en cuenta que el estator del accionamiento se instalará a 4.83 m del centro de masa de la carcasa del molino, además que los valores estimados del peso correspondiente al rotor 30 toneladas, carcasa del molino 231 toneladas, blindaje del molino 250 toneladas, carga del molino 438 toneladas. Se determina lo siguiente de la gráfica de cuerpo libre

$$R_1 = 4\,769\,877.77\text{ N}$$

$$R_2 = 4\,530\,322.22\text{ N}$$

se tiene como datos correspondientes el momento flector y el momento torsor respectivamente.

$$M_a = R_1 \cdot a = 4\,769\,877.77 \cdot 4.998\text{ m} = 23\,839\,849.09$$

También se conocen los siguientes datos.

- $D = 6.70\text{ m}$ (Diámetro exterior del molino)
- $n = 8.00$ (factor de seguridad de diseño – constante)
- $S_y = 405\text{ Mpa}$ (resistencia a la fluencia del acero Astm A36)
- $c = D/2$ (distancia al eje de giro)

Aplicando la ecuación (2.32). Espesor de la carcasa del molino.

$$\left(\frac{(D^2 - d^2)}{D}\right)^2 = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi \cdot S_y}\right)^2 \cdot (4(M_a^2) + T_m^2)$$

$$\left(\frac{(D^2 - d^2)}{D}\right)^2 = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi \cdot S_y}\right)^2 \cdot \left(4(M_a^2) + \left(\frac{S_y \cdot J}{c}\right)^2\right)$$

$$\left(\frac{(D^2 - d^2)}{D}\right)^2 = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi \cdot S_y}\right)^2 \cdot \left(4(M_a^2) + \left(\frac{S_y \cdot (D^4 - d^4)}{c}\right)^2\right)$$

Remplazando se obtiene:

- $d = 6.53\text{ m}$ (diámetro interno del molino sin elevadores)

De lo anterior determinamos que el espesor correspondiente a la carcasa del molino es:

$$e = \frac{D - d}{2} = \frac{6.70 \text{ m} - 6.53 \text{ m}}{2} = 0.085 \text{ m} \cong 9.00 \text{ cm}$$

Para la implementación de esta característica se consideró acero 1020, o acero común por su fácil obtención en el mercado nacional.

ESPESOR DE TRUNNION.

Aplicando la ecuación (2.32). Espesor de la trunnion del molino.

$$M_a = R_1 \cdot 0.2 = 4\,769\,877.77 \text{ N} \cdot 0.2 \text{ m} = 953\,975.55 \text{ Nm}$$

También se conocen los siguientes datos.

- $D = 1.80 \text{ m}$ (*Diametro exterior del trunnion*)
- $n = 8.00$ (factor de seguridad de diseño – constante)
- $S_y = 295 \text{ Mpa}$ (*resistencia a la fluencia del acero 1020*)
- $c = D/2$ (*distancia al eje de giro*)

Remplazando en la ecuación (2.32) se obtiene:

- $d = 1.66 \text{ m}$ (*diametro interno del trunnion*)

De lo anterior determinamos que el espesor correspondiente a la carcasa del molino es:

$$e = \frac{D - d}{2} = \frac{1.80 \text{ m} - 1.66 \text{ m}}{2} = 0.07 \text{ m} \cong 7.00 \text{ cm}$$

BLINDAJES Y REVESTIMIENTOS.

Para la implementación de los blindajes se determinó la utilización de acero al cromo molibdeno, según lo tipificado el SAE (Sociedad de ingenieros automotrices) sus elementos de aleación contienen cromo y molibdeno en un 20% y 25% respectivamente por lo cual es considerado un material más fuerte y más duro que el acero estándar 1020

Considerando que los elementos molturadores son de dimensiones que superan los 60 mm se implementara un sistema de onda simple. Teniendo una distribución acorde a la siguiente expresión.

$$N^{\circ} \text{LEVANTADORES (ONDA SIMPLE)} = 6.6 \times 6.7056$$

$$N^{\circ} \text{LEVANTADORES (ONDA SIMPLE)} = 44.25 \cong 45$$

Considerando para una mejor distribución de los levantamientos se considera 46 levantadores de onda simple, de igual manera considerando el revestimiento presente en el trunnion de carga y trunnion de descarga de pulpa para ambos casos se determinó la utilización de acero al cromo molibdeno con unos espesores de 76 mm y 65 mm respectivamente.

DIMENSIONAMIENTO DE DESCANSO.

Para el dimensionamiento de descansos por ser un tema poco difundido y por consiguiente de muy difícil acceso a información se determina la implementación de un sistema existente de un equipo de similares características de acuerdo a el manual de instalación, operación y mantenimiento de FLSmith.

DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE ACCIONAMIENTO.

El sistema de accionamiento a ser implementado en el presente proyecto será uno basado en tecnología de un motor síncrono. Debido a la necesidad de contar

con un giro uniforme durante el proceso de molienda. En consecuencia, se implementará un sistema sin engranajes por lo cual es el mismo molino que conformara el rotor del motor asíncrono cumpliendo los siguientes principios.

Remplazando en la ecuación (2.38) se obtiene:

$$12 \text{ RPM} = \frac{60 \cdot 60 \text{ Hz}}{P}$$

$$P = 300 \text{ Pares de Polos} = 600 \text{ Polos}$$

Por velocidad a la que debe de trabajar él se debería de implementar 600 polos en el rotor del molino que a su vez es el cuerpo del mismo, por la gran cantidad de polos se determina la implementación de solo 30 pares de polos lo cual deriva en la implementación de 60 polos en el rotor, debiendo de trabajarse en la variación de frecuencia para el funcionamiento del mismo, así mismo se deberá de tener en cuenta la operación del accionamiento en una capacidad menor a la de diseño. Para poder evitar sobre cargas y posteriores fallas.

$$P = 30 \text{ Pares de Polos} = 60 \text{ Polos}$$

Para los devanados de estator se tendrá presente la distribución para las fases de acuerdo a lo siguiente.

Remplazando en la ecuación (2.37) se obtiene:

$$q = \frac{N}{3 \cdot p} = \frac{180}{3 \cdot 60}$$

$$q = 1$$

Por la complejidad de los componentes adicionales para características específicas tanto para el funcionamiento como el mantenimiento de la maquinaria se opta por la implementación de un accionamiento marca ABB que

de acuerdo a lo detallado por el fabricante propone procesos de control ya determinados, así como complementos que mejoran el proceso de mantenimiento del mismo. los mismos que se deberán de solicitar teniendo en cuenta las características previamente determinadas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

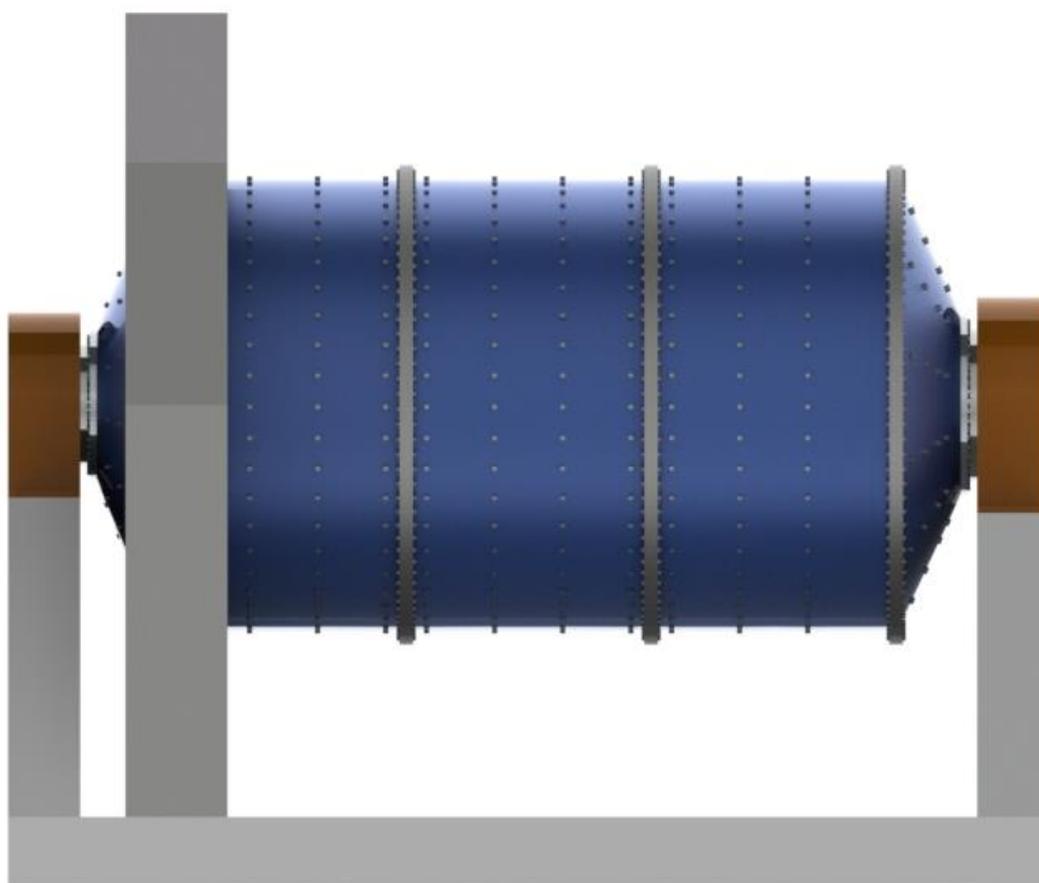
4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.2. DIMENSIONAMIENTO DE MAQUINARIA EN DISEÑO.

DISEÑO DEL MOLINO SEMIAUTOGENO (MOLINO DE BOLAS)

Los componentes considerados dentro de la implementación de un molino semiautogeno (molino de bolas) están instalados sobre la carcasa del mismo siendo este último componente fundamental en vista este será el que soportará los impactos provocados por los elementos molturadores en el interior del molino. De igual manera será a la carcasa del molino donde se implementarán los componentes correspondientes a blindajes revestimientos, trunnion de soporte para la implementación de los cojinetes hidrostáticos, rotor de accionamiento. Debiendo de implementarse en todos los casos mediante tornillos y tuercas con la finalidad de facilitar el remplazo de componentes que podrían deteriorarse durante la operación del molino, tratando que la paralización por mantenimiento de la maquinaria sea la mínima posible por ser una maquinaria de la cual se requiere una alta disponibilidad.

Figura N°4. 1: Vista lateral de CAM del molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (renderizado)

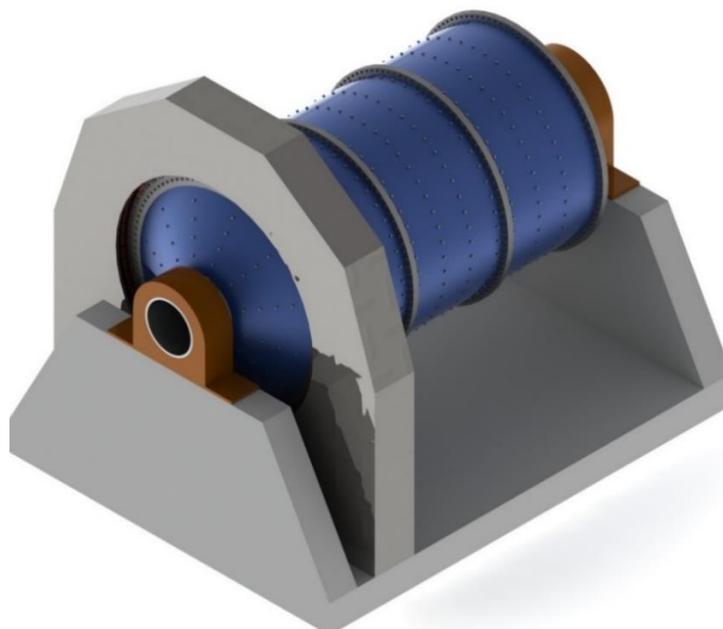
Elaboración: Propia

Los componentes considerados para el presente diseño se encuentran detallados en las tablas N°4.1, N°4.2, N°4.3, N°4.4, N°4.5, N°4.6 y N°4.7 las mismas que se encuentran implementadas de acuerdo a lo detallado en los planos presentes en la sección de anexos.

4.1.3. CORROBORACIÓN DE DATOS DE DISEÑO DE MOLINO

SEMIAUTOGENO

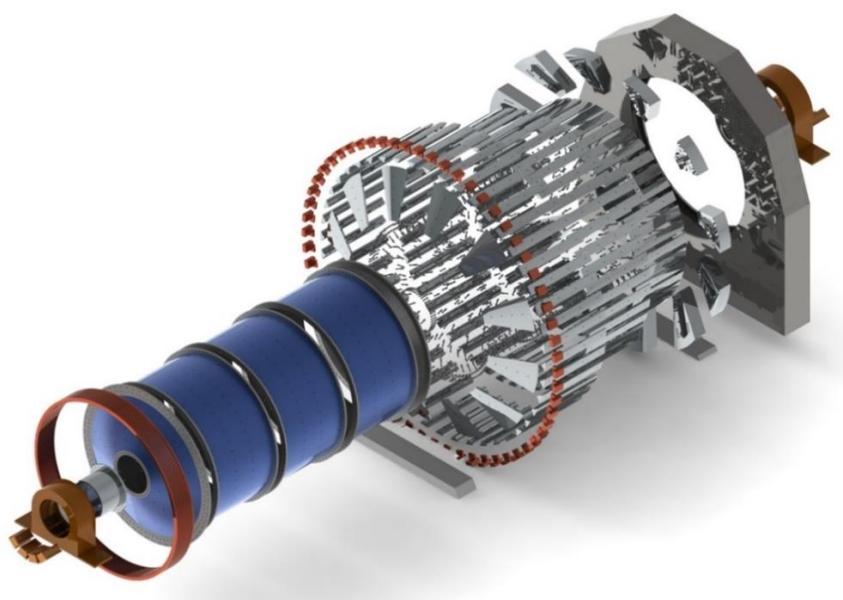
Figura N°4. 2: Vista perspectiva de CAM del molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (renderizado)

Elaboración: Propia

Figura N°4. 3: Vista perspectiva CAM del molino.

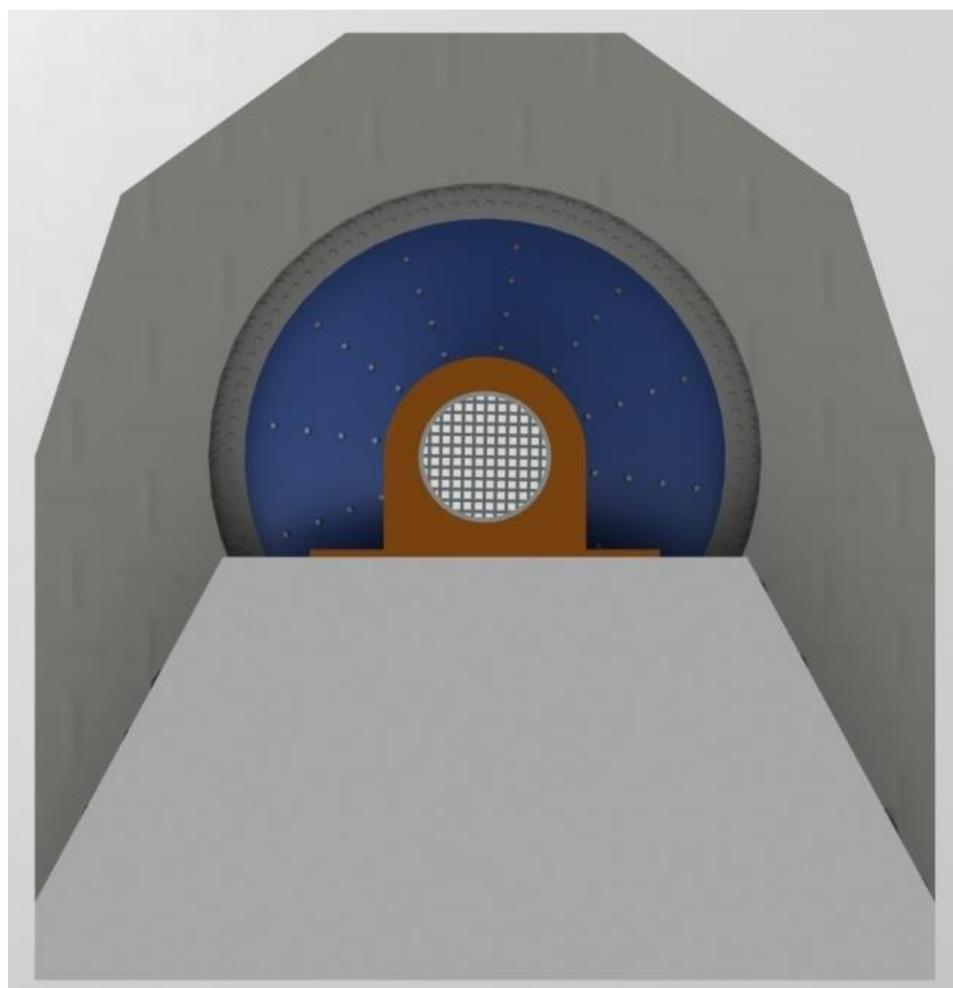


Fuente: software SolidWorks 2017 (renderizado)

Elaboración: Propia

Para poder determinar el funcionamiento de los datos obtenidos de manera matemática y poder determinar la viabilidad del funcionamiento del diseño se hizo uso del software SolidWorks el cual es un software CAD 3d para modelado mecánico, el cual nos permite realizar y observar la interacción de los componentes en diseño así como poder realizar análisis dinámico de dichos componentes, lo que permite tomar decisiones previas a la emisión de planos de fabricación en cuanto a las dimensiones halladas para cada uno de los componentes de diseño.

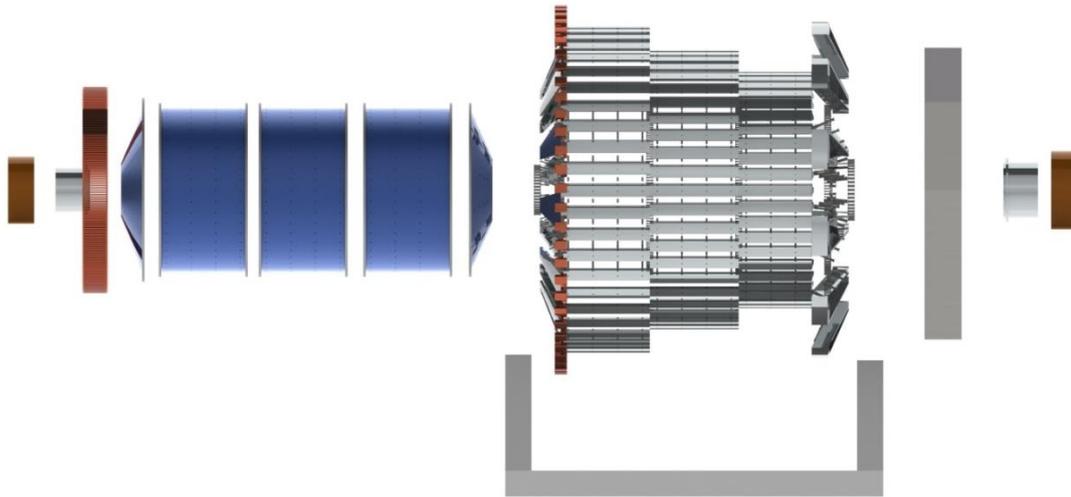
Figura N°4. 4: Vista posterior de CAM del molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (renderizado)

Elaboración: Propia

Figura N°4. 5: Vista lateral de CAM del molino.



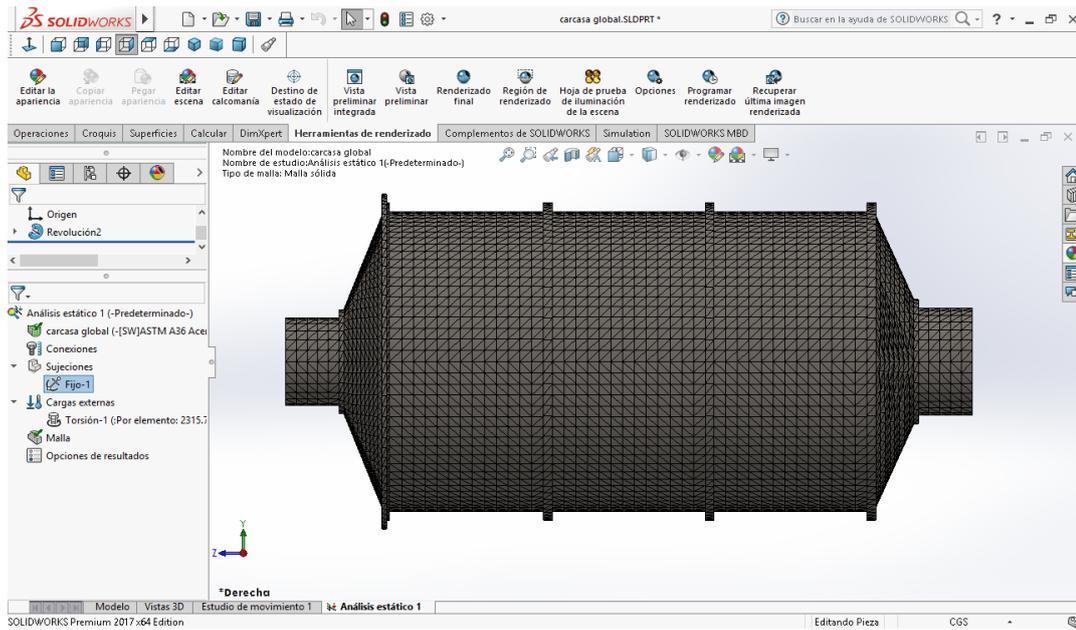
Fuente: software SolidWorks 2017 (renderizado)

Elaboración: Propia

Por ser la carcasa el componente encargado de portar a los demás componentes del diseño se determina realizar en esta la simulación de esfuerzos.

Se realiza la subdivisión del componente en pequeñas partes a la cual se le denomina malla o mallado con la finalidad de poder realizar el análisis por elementos finitos.

Figura N°4. 6: Implementación de malla para proceso de simulación.

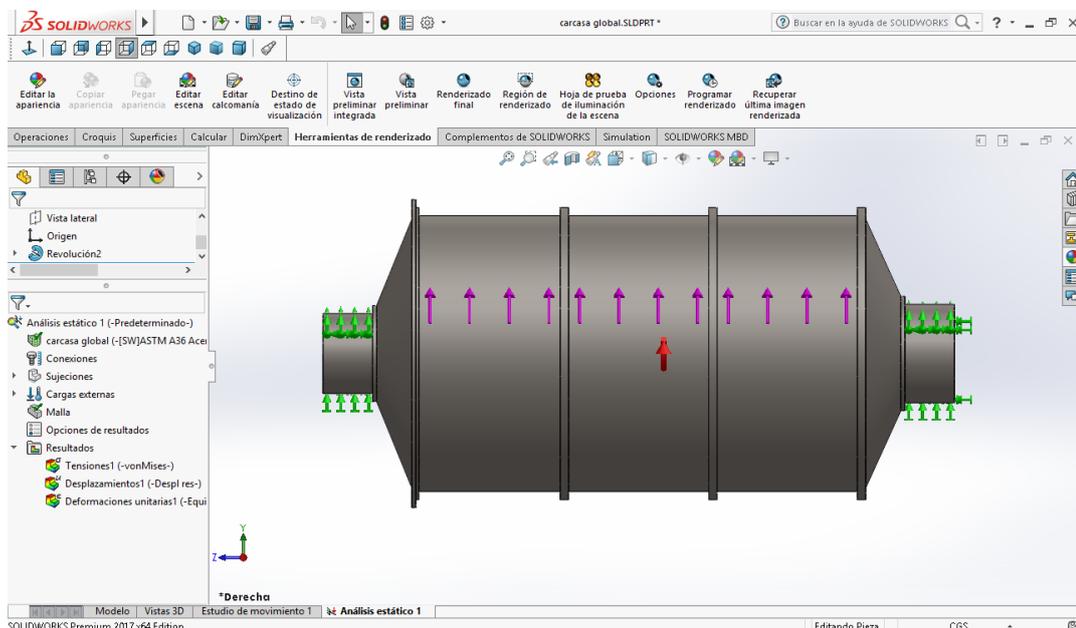


Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

4.1.3.1. SIMULACIÓN DE FUERZAS ACTUANTES EN LA CARCASA.

Figura N°4. 7: Representación de fuerzas actuantes en el molino.

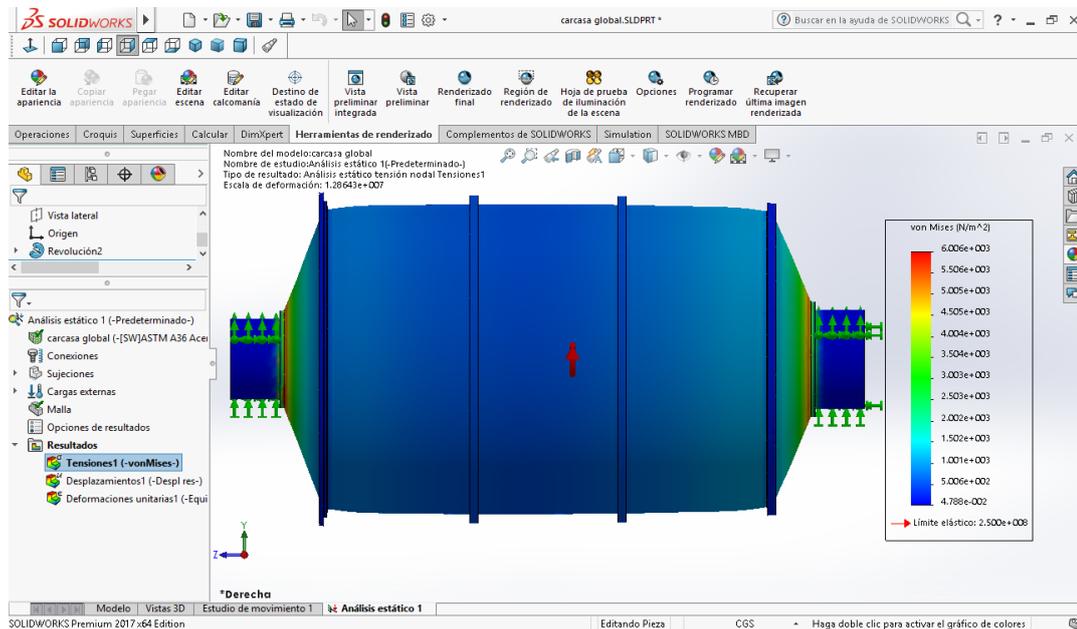


Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

4.1.3.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA TENSIONES

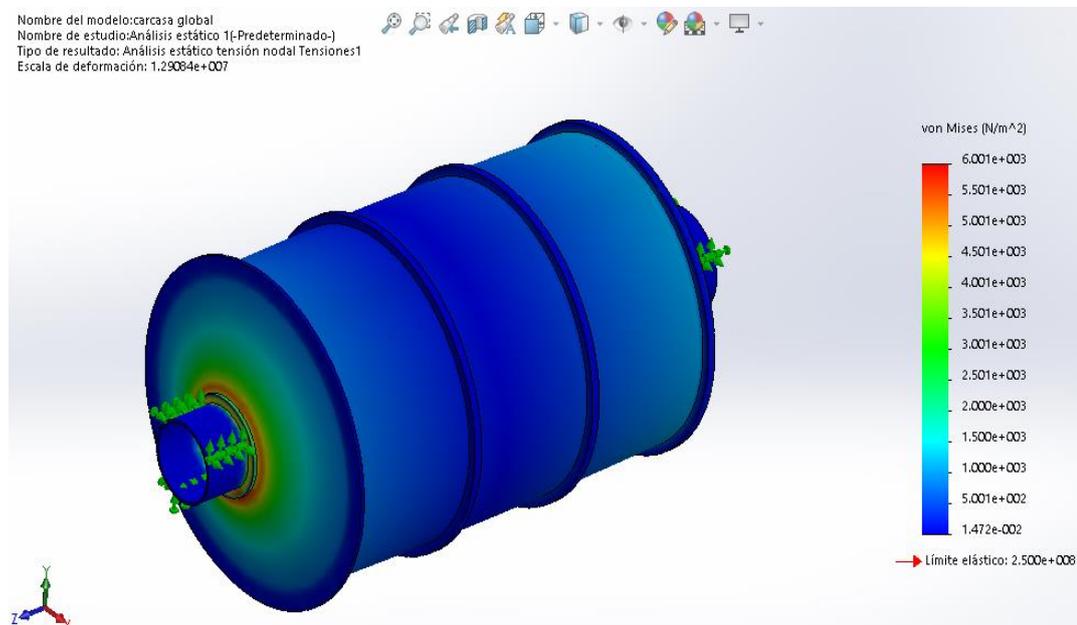
Figura N°4. 8: Representación de tensiones en el molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

Figura N°4. 9: Tensiones en el molino vista perspectiva.

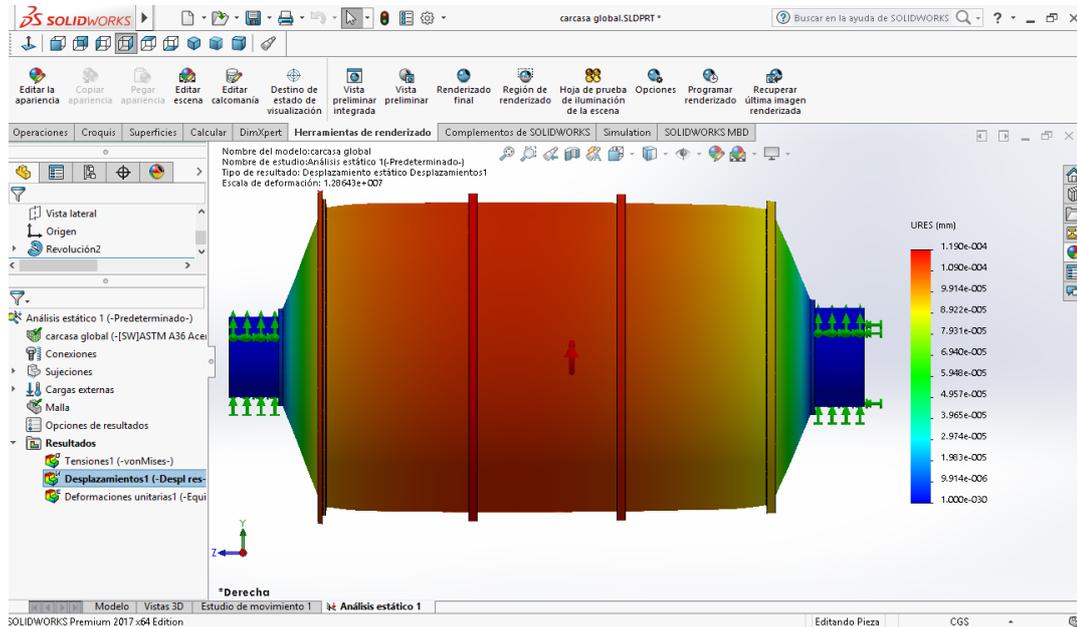


Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

4.1.3.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA DESPLAZAMIENTOS.

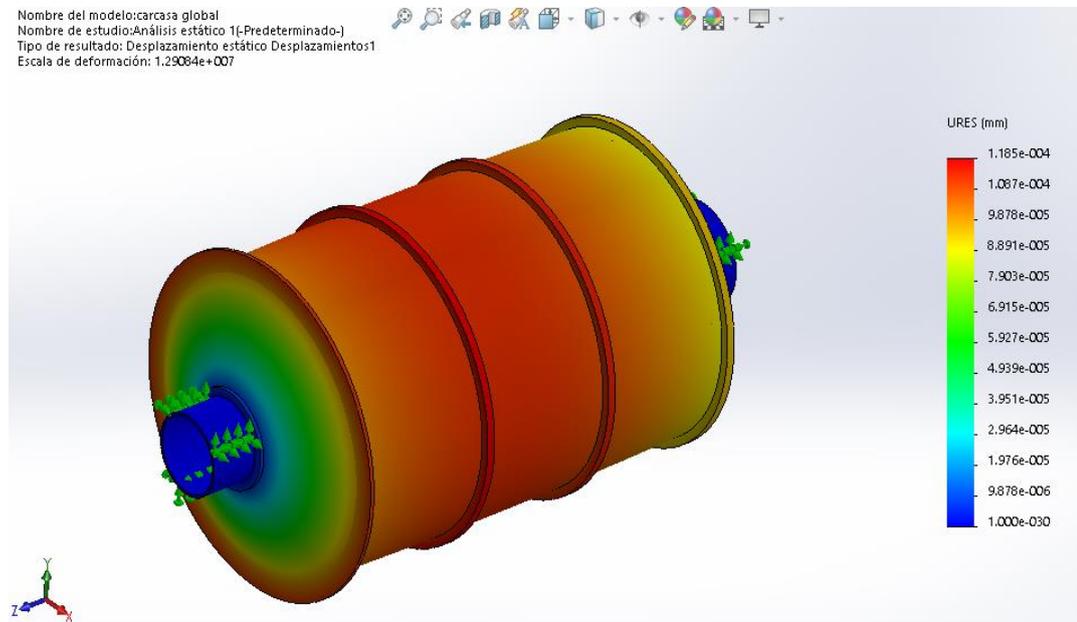
Figura N°4. 10: Representación de desplazamientos en el molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

Figura N°4. 11: Desplazamientos en el molino vista perspectiva.

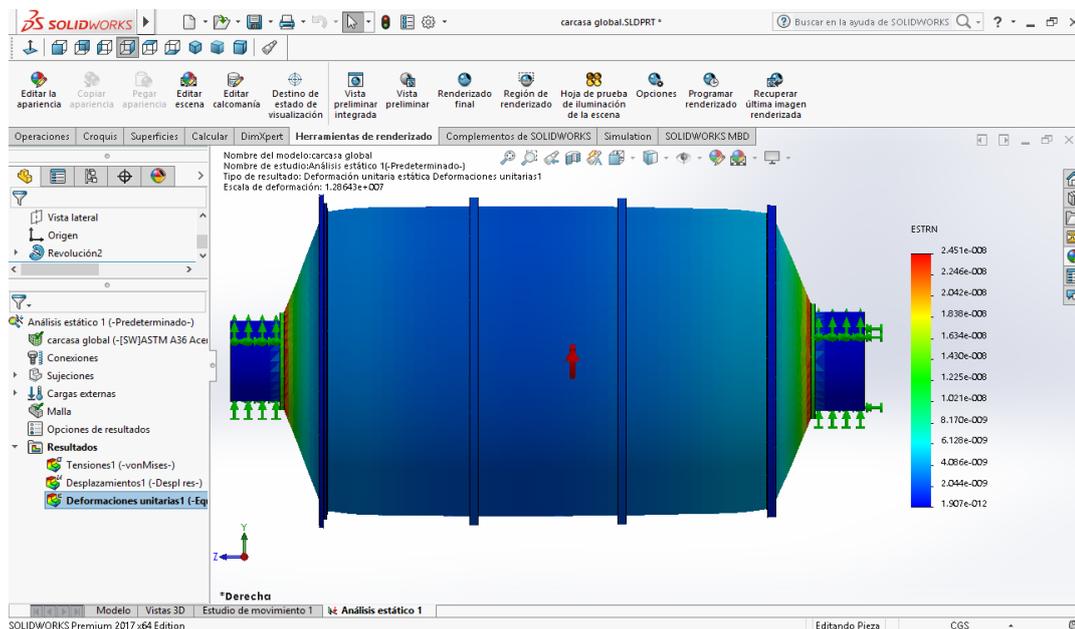


Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

4.1.3.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PARA DEFORMACIONES.

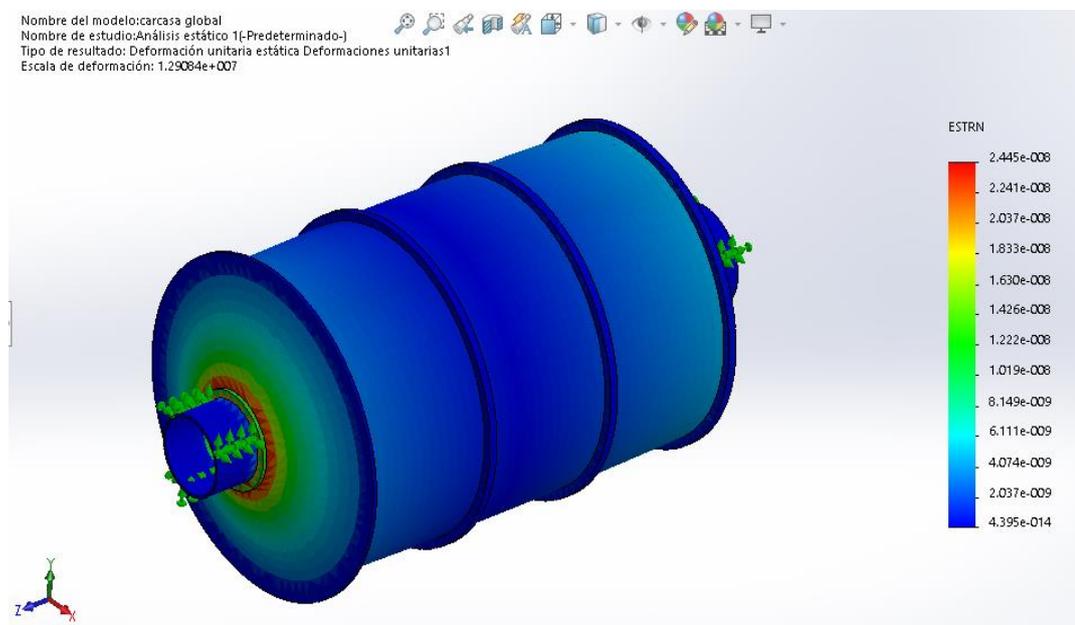
Figura N°4. 12: Representación de deformaciones en el molino.



Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

Figura N°4. 13: Deformaciones en el molino vista perspectiva.



Fuente: software SolidWorks 2017 (Captura Simulación)

Elaboración: Propia

de las simulaciones anteriores podemos determinar que en todos los casos ninguna de características supera las condiciones críticas de funcionamiento, determinándose la viabilidad para la emisión de los planos correspondientes de fabricación correspondiente a componentes globales del diseño.

Los datos obtenidos para el dimensionamiento del molino semiautogeno (molino de bolas) fueron obtenidos en el apartado 3.5.1 con cuyos datos se consolidan las siguientes tablas.

Tabla N°4. 1: Detalle de características de implementación.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
TAMAÑO DE MINERAL DE INGRESO	150 MM CON UN PORCENTAJE DE SOLIDOS DE 97%
TAMAÑO DE MINERAL DE SALIDA	0.24 MM CON UN PORCENTAJE DE SOLIDOS DE 38%

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 2: Detalle de funcionamiento de molino semiautogeno.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
ALTURA DE CARGA	2.204 METROS CON RESPECTO A LA BASE DEL MOLINO EN ESTADO ESTATICO.
VOLUMEN DE CARGA	109.12 m ² CORRESPONDIENTE A LA ALTURA DE CARGA, REPRESENTA EL 28.66% DEL VOLUMEN TOTAL DEL MOLINO

ELEMENTOS MOLTURADORES	CUERPOS ESFÉRICOS DE 3" DE DIÁMETRO EN ACERO FUNDIDO
VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO	VELOCIDAD CRITICA: 16.44 RPM VELOCIDAD OPTIMA: 12.00 RPM

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 3: Datos generales del molino semiautogeno.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
TAMAÑO DEL MOLINO	6.70 METROS DE DIÁMETRO, 10.80 DE LONGITUD EFECTIVA DE MOLIENDA
TIPO DE MOLINO	MOLINO SEMIAUTOGENO(BOLAS) DE TRITURACIÓN HÚMEDA Y DESCARGA POR REJILLAS
POTENCIA DEL MOTOR DE ACCIONAMIENTO DEL MOLINO	9.00 MEGAWATTS ACCIONAMIENTO SIN ENGRANAJES PARA MOLINOS O GMD EN LA MARCA ABB DE 60 POLOS EN EL ROTOR, CONTENDRA SISTEMA DE EQUIPOS AUXILIARES INCLUYE SISTEMAS DE CONTROL DEL ACCIONAMIENTO (ALGORITMO), SISTEMAS DE PROTECCION,

ESTATOR DIVIDIDO EN CUARTOS
DEVIDAMENTE RIGIDIZADOS Y
TESTEADOS, BOBINADO
SOLDADO Y LLENADAS DE
RECINA, DEBERA DE POSEER
MODOS DE OPERACIÓN LENTO Y
DE GIRO POR GRADOS PARA EL
MANTENIMIENTO.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 4: Datos del casco del molino semiautogeno.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
DIÁMETRO INTERIOR	6.53 METROS
LONGITUD EFICAZ DE TRITURACIÓN (EGL)	10.80 METROS
GROSOR DE LA PLACA (ESPESOR DE LA CARCASA)	0.09 METROS (9.00 CENTÍMETROS)
ESPECIFICACIÓN DE LA PLACA	ASTM A 36 PARA EL CASCO Y ASTM A 36 Z 25 PARA LAS BRIDAS NORMALIZADAS
CONFIGURACIÓN DE BRIDAS	EXTERNA EMPERNADA BRIDA CABEZAL

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 5: Datos de los cojinetes principales.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
TIPO DE COJINETE	HIDROSTÁTICO, DE ALMOHADILLAS MÚLTIPLES, CON CUATRO ALMOHADILLAS POR COJINETE.
TAMAÑO DE COJINETE	2.74 METROS DE DIÁMETRO X 0.9 METROS DE ANCHO
MATERIAL DE LOS COJINETES	BRONCE
TIPO DE LUBRICACIÓN DE LOS COJINETES	HIDROSTÁTICA
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LOS COJINETES	SOLERAS FABRICADAS, TAPA PARA LA BASE DEL COJINETE Y BLOQUES DE SOPORTE DE COJINETE TODOS ELLOS EN ACERO ASTM A36 CON INSERTOS DE IZADO PARA BRONCE.

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 6: Datos del cabezal trunnion.

ESPECIFICACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
DIÁMETRO INTERIOR DEL TRUNNION	1.66 METROS
TIPO DE TRUNNION	TIPO DESMONTABLE PARA EMPERNAR EN LAS BRIDAS.
ESPECIFICACIÓN PARA LOS MATERIALES DE LOS TRUNNION	HIERRO DUCTIL ASTM A 536

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°4. 7: Datos de revestimiento de molino semiautogeno.

ESPECIFICACIÓN DEL ÁREA DE IMPLEMENTACIÓN	RESULTADO CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES
REVESTIMIENTO DE CASCO	
MATERIAL	ACERO AL CROMO MOLIBDENO
GROSOR	0.25 METROS EN ELEVADORES
REVESTIMIENTO DE TRUNNION DE CARGA	
MATERIAL	ACERO AL CROMO MOLIBDENO
GROSOR	0.07 METROS
ELEVADOR DE DESCARGADOR DE PULPA	
MATERIAL	ACERO AL CROMO MOLIBDENO
GROSOR	0.07 METROS

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

PRIMERO: Mediante la presente investigación se logró obtener mediante la implementación de un protocolo de diseño, las características correspondientes a un molino de bolas semiautogeno las mismas que nos permitirán la fabricación de dicha maquinaria teniendo presente investigaciones anteriores resaltándose lo siguiente:

Tabla N°4. 8: Discusión investigaciones anteriores.

INVESTIGACIONE	INVESTIGACIONES ANTERIORES
<p>Calculo de características específicas de cada uno de los componentes: diámetro, longitud, espesor y otros detalles adicionales correspondiente a cada pieza.</p> <p>Calculo y dimensionamiento de componentes internos del molino considerándose su interacción correspondiente a su entorno de trabajo.</p> <p>Consideración de la implementación de sistemas de uso actual para la implementación más eficiente de la maquinaria.</p>	<p>Calculo de características generales de la maquinaria: diámetro y longitud</p> <p>No consideración de componentes como blindajes, elevadores de pulpa y sistemas de descarga. Presentes en el interior del molino.</p> <p>No se consideran la implementación de nuevos sistemas diseñados para la implementación de maquinarias similares: accionamientos y sistemas de soporte</p>

<p>Consideración y testeo de los componentes con la asignación correspondiente de materiales considerando las características de los mismos.</p>	<p>No consideración de las características de los materiales utilizados en cada uno de los componentes. Obviándose así el comportamiento de dichos componentes durante el funcionamiento.</p>
<p>Se realizaron testeos computacionales correspondientes a cada uno de los componentes del diseño pudiendo precisarse el normal la operación del mismo dentro de los rangos permisibles para el mismo.</p>	<p>No se realizan pruebas de los resultados obtenidos por no contar con el diseño de los componentes globales del diseño por lo cual no se puede precisar el correcto funcionamiento del mismo.</p>

Fuente: Elaboración propia

Se logro obtener un protocolo que nos pueda brindar información suficiente para la fabricación de componentes y por consiguiente de la maquinaria en su conjunto teniendo en cuenta las características bajo las cuales cada uno de los componentes deberá de trabajar al momento de la implementación.

SEGUNDO: El proyecto permitió que, mediante la utilización de fórmulas correspondientes a cada una de las características de los componentes a ser implementados, determinar dimensiones, características de implementación, materiales por componente y características de componentes más complejos como el sistema de accionamiento y el de cojinetes los mismos que por su complejidad se determinó la implementación de componentes ya existentes similares.

TERCERO: Nos permitió acceder al diseño asistido por computadora mediante una plataforma CAD en vista que se usó esta última con la finalidad de poder corroborar si las características obtenidas previamente de manera matemática son concordantes para su fabricación. Para el presente proyecto se hizo uso de software SolidWorks 2017, el mismo que nos permitió verificar de manera gráfica el comportamiento del molino sometido a las características de funcionamiento del mismo.

RECOMENDACIONES

PRIMERO: realizar mayor investigación acerca de implementación de maquinaria necesaria en nuestro país en los diversos rubros industriales con la finalidad de poder abordar a nivel de diseño dichas maquinarias a fin de poder ser fabricadas en nuestro país en vista que la mayoría de la maquinaria necesaria es importada o en su defecto no diseñada.

SEGUNDO: realizar cálculos con datos correspondientes a mineras presentes en la región puno para su posterior desarrollo e implementación de maquinaria correspondiente a las mismas teniendo en cuenta las características novedosas y de avance en cuanto al rendimiento de las mismas.

TERCERO: incentivar la utilización de software de diseño asistido por computadora con la finalidad de poder testear la maquinaria diseñada pudiendo así obtener dimensiones características entre otros más cercanos a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Budynas R. & Nisbett J. (2008) *“DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY, OCTAVA EDICIÓN”*. México: McGraw-Hill.
- Smith W. & Hashemi J. (2006). *“FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES, CUARTA EDICIÓN”*. México: McGraw-Hill.
- Besa A. & Valero F. (2016). *“DISEÑO DE MAQUINAS”*. Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Montudar E. (2013). *“OPTIMIZACIÓN DE LA RELACIÓN DE BOLAS, PARA LA MOLIENDA DE PIEDRA CALIZA MEDIANTE EL USO DE UN MOLINO EXPERIMENTAL”*. Guatemala: Universidad De San Carlos de Guatemala.
- Andrea E. *“BLOQUE I CAPITULO 4. CIRCUITOS DE FRAGMENTACIÓN - OPEN COURSE WARE”*. Universidad de Cantabria.
- Kummlee H. & Meinke P. (2001). *“A MECHATRONIC SOLUTION DESIGN AND EXPERIENCE WITH LARGE GEARLESS MIL DRIVES”*. Erlangen Berlin.
- Rivera I., Quintero F., Bustamante O. & Loayza G. (2014). *“APLICACIÓN DE UN MODELO DE BALANCE POBLACIONAL A UN MOLINO DE BOLAS EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO”*. Colombia: Universidad EAFIT – Medellín.

- Doll A. (2015). *“TECHNICAL MEMORÁNDUM SAG MILL + BALL MILL CIRCUIT SIZING”*.
- Barratt D. (1989). *“AN UPDATE ON TESTING, SCALE-UP AND SIZING EQUIPMENT FOR AUTOGENOUS AND SEMI- AUTOGENOUS GRINDING CIRCUITS”*. 1989 SAG Conference.
- Bassani R.& Piccigallo B. (1992). *“HYDROSTATIC LUBRICATION PRIMERA EDICIÓN”*
- Coello A. (2001). *“MOLIENDA DE MINERALES MULTICOMPONENTE: MODELO INTEGRO DIFERENCIAL PARA LA VALORIZACIÓN DE LA ENERGÍA”* Rusia: minería y geología.
- Ahrens M. Gonser J. (2007) *“TECHNICAL AND COMERCIAL BENEFITS OF GEARLESS MILL DRIVES FOR GRINDING APPLICATIONS”*. SME Annual Meeting. Denver. Colorado.
- Barrios M. (2015) *“OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE UN MOLINO DE BOLAS”*. Arequipa: Universidad Nacional De San Agustín
- Las Bambas M. (2015) *“Manual de Operaciones – Concentradora”*.



ANEXOS